

ISBN 5-7763-8361-7

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

**АВТОМАТИКА**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ**

**КОМПЛЕКСЫ И**

**СИСТЕМЫ**

**№ 2(18) 2006**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ**  
**УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ**  
**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ.**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

*Издание Херсонского национального технического университета*

**№ 2(18)**

**ХЕРСОН**

**2006**

*Основан в июле 1997 г.*

*Выходит два раза в год*

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

*Главный редактор:* Тодорцев Ю.К.

*Члены редколлегии:* Аркадьев В.Ю., Бардачев Ю.Н., Бойко В.И., Большевцев А.Д., Бондарь В.М., Бражник А.М. (зам. главного редактора), Гаврилюк В.И., Герасимьяк Р.П., Григоровский Е.П., Гринавцев В.Н., Демченко В.А., Дудюк Д.Л., Дубинец Л.В., Живица В.И., Карпинский М.П., Кондратенко Ю.П., Кузнецов Б.И., Ладанюк А.П., Лут М.Т., Лубяный В.З., Максимов М.В., Марасанов В.В., Мартиненко И.И., Мережко Ю.И., Михайлик В.Д., Мишин В.И., Павлов А.А., Праховник А.В., Радимов С.Н., Рогальский Ф.Б., Садовой А.В., Сарибеков Г.С., Смолин Ю.А., Ткаченко А.Н., Тришкин В.Я, Труш В.Е., Ходаков В.Е., Хомченко А.Н. (зам. главного редактора), Червяков В.Д., Шарко А.В., Шикалов В.С., Эриванцев И.Н., Яськив В.И., Лебеденко Ю.А. (технический редактор)  
*Корректор:* Лебеденко Н.О.

**ОРГАНИЗАЦИИ - ОСНОВАТЕЛИ ЖУРНАЛА**

Херсонский национальный технический университет  
Одесский национальный политехнический университет  
Национальный технический университет Украины «КПИ»  
Международный университет гражданской авиации  
Одесская государственная академия холода  
Днепродзержинский государственный технический университет  
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры  
Национальный аграрный университет  
Украинский государственный химико-технологический университет  
Украинский государственный университет пищевых технологий  
Украинская инженерно-педагогическая академия  
Национальный университет кораблестроения им. Ад. Макарова  
Украинский государственный лесотехнический университет  
Сумской государственной университет  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры  
Киевский национальный университет технологий и дизайна  
Тернопольский государственный технический университет им. Ивана Пулюя  
Тернопольская академия народного хозяйства  
Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта  
Херсонский государственный аграрный университет

Усл. печ. листов 13,1      Тираж - 200 экз.      Формат 60x84 1/8

Свидетельство о регистрации КВ № 2997 от 10.12.1997 г.

Офсетная печать

Цена договорная

© Херсонский национальный технический университет

# ГЕРАСИМЯК РОСТИСЛАВ ПАВЛОВИЧ

(к 75 – летию со дня рождения)



25 октября 2006 г. исполняется 75 лет известному в Украине и за рубежом ученому и педагогу, доктору технических наук, профессору кафедры “Электромеханические системы с компьютерным управлением” Одесского национального политехнического университета Герасимяку Ростиславу Павловичу.

После окончания в 1953 г. электротехнического факультета Одесского политехнического института Ростислав Павлович работал в конструкторском отделе Новокраматорского машиностроительного завода (г. Краматорск, Донецкой области). В 1957 г. был приглашен на работу ассистентом кафедры электропривода в Одесский политехнический институт, где и работает по настоящее время, пройдя все ступеньки иерархии – ассистента, аспиранта, ст. преподавателя, доцента, профессора. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию. В период 1967-73 г.г.

Р.П. Герасимяк работал заведующим кафедрой электропривода ОПИ. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Создание регулируемых асинхронных электроприводов специальных кранов», а в 1989 г. ему присвоено ученое звание профессора.

До настоящего времени проф. Герасимяк Р.П. написал 4 монографии (2 – без соавторов) и свыше 180 научных статей в области регулируемого асинхронного электропривода и микропроцессорного управления сложными электромеханическими системами. Им получено 13 авторских свидетельств на изобретения. Он подготовил 16 кандидатов технических наук, 6 из них – иностранные граждане из стран Европы, Азии и Африки; был научным консультантом трех соискателей ученой степени доктора технических наук.

Сейчас Герасимяк Р.П. руководит семинаром «Проблемы динамики автоматизированных электротехнических систем переменного тока» Научного Совета НАН Украины по комплексной проблеме «Научные основы электроэнергетики».

Как умудренного опытом ученого и педагога, его часто приглашают в комиссии по аттестации высших учебных заведений 2-4 уровней аккредитации. Он является членом президиума министерского методсовета по направлению «Электромеханика».

Несмотря на возраст, Ростислав Павлович обладает большим зарядом бодрости и энергии. В настоящее время она направлена на работу по повышению научного уровня публикаций и расширению сборника «Электромашиностроение и электрооборудование», образованию и воспитанию новых поколений научных и педагогических работников. Он активно участвует в Украинских и международных научных конференциях. Среди коллег по кафедре и институту Ростислав Павлович пользуется заслуженными авторитетом и любовью.

Члены редакционной коллегии научно-технического журнала ААЭКС сердечно поздравляют Ростислава Павловича с юбилеем! Желаем крепкого здоровья, человеческого счастья, новых творческих достижений в организаторской, научной и педагогической деятельности!

*Редакционная коллегия ААЭКС*

# СОДЕРЖАНИЕ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

<b><u>Китаев А.В., Сушич Е.Ф.</u></b> Приложение положений теории дросселя и трансформатора к расчету и анализу электромагнитом переменного тока.....	6
<b><u>Попруга А.Г.</u></b> Теоретические и экспериментальные исследования электрических нагревателей по критерию экономии энергии.....	14
<b><u>Тернова Т.І.</u></b> Урахування морфогенетичного рівняння в математичній моделі тканини .....	24
<b><u>Тулученко Г.Я.</u></b> Інформаційний модуль експрес-пошуку точок еквівалентності процесу нейтралізації.....	33
<b><u>Шпильовий Л.В.</u></b> Математична модель та алгоритм екстремального управління процесом осадження дисперсної фази суспензії .....	38

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<b><u>Казак В.М., Гальченко С.М., Завгородній С.О.</u></b> Аналіз можливості застосування імовірнісних методів розпізнавання для виявлення пошкоджень зовнішнього обводу літака.....	45
<b><u>Квасников В.П., Баранов А.Г.</u></b> Анализ влияния дестабилизирующих факторов на работу биканальной координатно-измерительной машины.....	52
<b><u>Крылов В.Н., Полякова М.В., Волкова Н.П.</u></b> Контурная сегментация в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования с использованием математической морфологии.....	57
<b><u>Мороз В. В.</u></b> R-D проблема и эффективность систем сжатия изображений.....	64

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<b><u>Кирюшатова Т.Г., Григорова А.А.</u></b> Влияние направленности отдельных операторов и направленности всей группы на конечный результат выполнения поставленной задачи .....	70
<b><u>Коршевнюк Л.О.</u></b> Застосування комітетами експертів системи нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю.....	73
<b><u>Пономаренко Л.А., Меликов А.З., Нагиев Ф.Н.</u></b> Анализ системы обслуживания с различными уровнями пространственных и временных приоритетов.....	80
<b><u>Сідлецький В.М., Ельперін І.В., Ладанюк А.П.</u></b> Розробка алгоритмів підсистеми підтримки прийняття рішень для контролю якості роботи дифузійного відділення.....	92
<b><u>Ускач А.Ф., Гогунский В.Д., Яковенко А.Е.</u></b> Модели задачи распределения в теории расписания .....	98

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ**

<b><u>Песчанский А.И.</u></b> Оптимальное техническое обслуживание двухкомпонентной параллельной системы с учетом наработки каждого элемента .....	105
<b><u>Рябкин Ю.В., Карнаух В.В.</u></b> Квазиоптимальная обработка коротких радиоимпульсов в акустооптическом спектроанализаторе.....	113
<b><u>Смітюх Я.В., Кишенько В. Д.</u></b> Оптимізація управління процесами брагоректифікації .....	117

## **МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

<b><u>Клименко А.К.</u></b> Об оптимизации коэффициента усиления в адаптивной системе с обратной моделью .....	125
<b><u>Кучеров Д.П.</u></b> Синтез адаптивной квазиоптимальной по быстродействию системы управления при входном воздействии вида квадратичной функции и наличии ограниченных помех .....	132

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

<b><u>Іволгіна Т.О.</u></b> Енергетичний підхід до аналізу стійкості руху вимірювальної головки координатно-вимірювальної машини .....	141
<b><u>Левченко А.А., Кравчук О.И.</u></b> Эквивалентный макромодуль процесса технического обслуживания радиотехнических средств. ....	145
<b><u>Пономарьов Я.Ю., Ладанюк А.П., Іващук В.В.</u></b> Досвід використання нечітких регуляторів в системі атоматизації випарної установки .....	150
<b><u>Федоровский К.Ю., Владецкий Д.О.</u></b> Интенсификация теплоотвода замкнутых систем охлаждения энергоустановок морских технических средств.....	154

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

<b><u>Боярчук В.П., Головащенко Н.В., Рудакова А.В.</u></b> Динамическая модель распределения нагрузки в энергосистеме Херсонской области .....	159
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **ЭКОНОМИКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА**

<b><u>Сирота О.П.</u></b> Використання обмежувально-продукційного метода подання знань для аналізу несуперечності нормативних актів на прикладі фрагментів Закону України “Про податок з доходів фізичних осіб” .....	167
<b><u>Пляшкевич Е.Н.</u></b> Принятие управленческих решений на основе дробно-линейного программирования.....	171

<b><u>РЕФЕРАТЫ</u></b> .....	178
------------------------------	-----

<b><u>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</u></b> .....	184
-----------------------------------------	-----

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.316.37.

ПРИЛОЖЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ДРОССЕЛЯ И  
ТРАНСФОРМАТОРА К РАСЧЕТУ И АНАЛИЗУ ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Китаев А.В., Сушич Е.Ф.

Вопросу исследования электромагнитов переменного тока уделено большое внимание в курсе "Электрические аппараты" [1-5]. Однако анализ их поведения построен столь своеобразно, что создается впечатление о электромагнитах, как самостоятельной группе устройств, которая с дросселями и трансформаторами не имеет явно выраженной общности. В то же время в ТОЭ [6,7], где закладываются основы теории дросселя и трансформатора, указывается, на очевидность их приложения к исследованию аналогичных устройств (электромагнитов, электрических машин и т.д.). Ниже предлагается построить изложение затронутого вопроса так, чтобы произошло единение двух научных направлений на основе принципов системности и преемственности.

Пусть исследуемый электромагнит имеет магнитную цепь, конфигурация которой приведена на рис.1.

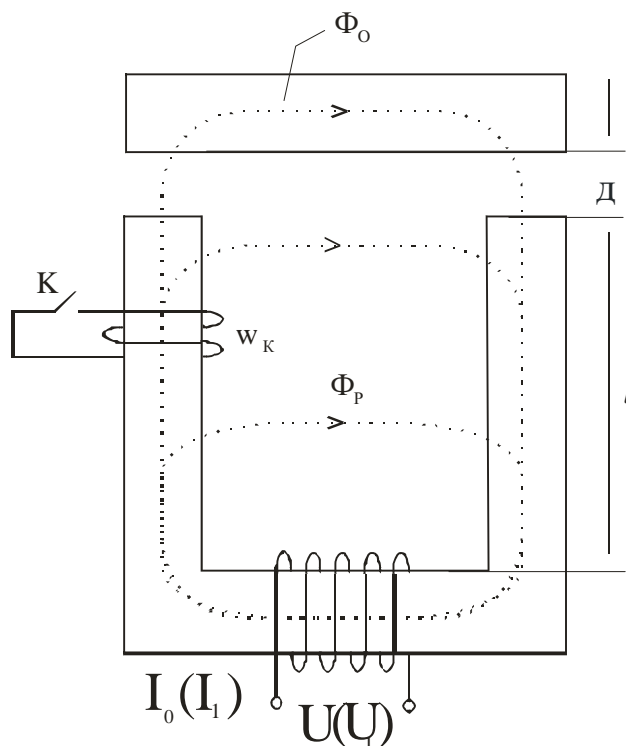


Рис. 1 Конфигурация исследуемой магнитной цепи

Тогда при условии разомкнутого рубильника К он представляет собой обычный дроссель, анализ которого выполняется при условии, что известны: напряжение сети питания  $u = U_m \sin \omega t$ , геометрические размеры сердечника, его материал, семейство петель гистерезиса и основная кривая магнитной индукции, проходящая через вершины этих петель. В случае электромагнита перечень исходных данных расширяется, поскольку считаются известными поток воздушного зазора  $\Phi_0$  и габаритные размеры катушки, в

соответствии с которыми устанавливается средняя длина витка  $l_{cp}$  и площадь окна обмотки  $Q_{об}$ . Это обстоятельство существенно упрощает анализ электромагнита по сравнению с дросселем, но не меняет его целевого назначения: определение м.д.с. обмотки  $I_0 w$  и ее числа витков  $w$ . Для решения задачи воспользуемся системой основных уравнений дросселя, которая согласно метода эквивалентных синусоид записывается в комплексной форме:

$$\underline{U} = \underline{I}_o R + jX_p \underline{I}_o + \underline{E}_o \quad (1)$$

$$\underline{I}_o = \underline{I}_{oa} + \underline{I}_{op}, \quad (2)$$

где  $R, X_p$  – соответственно активное и индуктивное сопротивление обмотки;

$E_o$  – э.д.с. от магнитного потока  $\Phi_0$ ;

$I_{oa}, I_{op}$  – соответственно активная и реактивная составляющие тока  $I_0$ ; является основой для составления схемы замещения и построения векторной диаграммы дросселя (электромагнита) (см. рис. 1).

Составляющая тока  $I_{op}$  определяется по результатам расчета магнитной цепи согласно методике, приведенной в [5]. Итогом расчета является равенство:

$$I_{op} w = 2(H_\delta \cdot \delta + \sum_{i=1}^k H_i \ell_i)$$

где  $H_\delta$  - магнитная напряженность воздушного зазора  $\delta$ ;

$H_i$  - магнитная напряженность участка "i" (при числе участков равном "k");

$\ell_i$  - длина участка "i".

Отсюда следует, что

$$I_{op} = \frac{2}{w} (H_\delta \cdot \delta + \sum_{i=1}^k H_i \ell_i) \quad (3)$$

На основании данных того же расчета определяются потери в стали сердечника:

$$P_c = K_D (p_{yD})_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_{mi}^2 m_i$$

где  $K_D$  - коэффициент, учитывающий увеличение потерь из-за наклепа при штамповке и при выполнении других технологических операций.

$(p_{yD})_{1,0/50}$  - потери в стали при частоте  $f = 50$  Гц и магнитной индукции 1,0Тл;

$B_{mi}$  - амплитуда магнитной индукции на участке "i";

$m_i$  - масса участка "i";

$\beta$  - показатель степени, зависящий от марки стали.

Значения  $K_D$ ,  $(p_{yD})_{1,0/50}$  и  $\beta$  для электротехнических сталей найдены

экспериментальным путем и берутся согласно данным таблицы:

Марка стали	$K_D$	$(p_{yD})_{1,0/50}$	$\beta$
2011, 2013, 2211	для всех марок	2,5 ÷ 2,6	1,5
2312	1,4 ÷ 1,8	1,75	1,4
2411		1,6	1,3

При известном значении  $P_C$  составляющая тока  $I_{oa}$  рассчитывается по формуле:

$$I_{oa} = \sqrt{2} \frac{P_c}{U_m} \text{ и тогда модуль тока } I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}.$$

Если сопоставить между собой формулу (3), а также соотношения для  $R$ ,  $X_p$  и  $E_0$ :

$$R = \rho \frac{l_{cp}}{q} W; \quad X_p = \frac{2\pi}{3} f W^2 \lambda l; \quad E_0 = 4,44 f W \Phi_{om};$$

где  $q$  - сечение провода;  $\lambda$  - удельная проводимость для потока рассеяния;  $l$  - высота стержня; то окажется, что все они зависят от  $w$ , которое подлежит определению. Отсюда возникает возможность поиска  $w$  на основе таблично-графического метода. С этой целью определяется предварительное (расчетное) и явно завышенное число витков  $w_{расч}$  при условии, что составляющие  $IR$  и  $IX_p$  уравнения (1) пренебрежимо малы:

$$w = \frac{U}{4,44 f \Phi_{om}}$$

Тогда  $E_0$ ,  $R$ ,  $X_p$ ,  $I_{op}$  и  $I_o$  приобретают конкретные числовые значения, которые заносятся в таблицу, и на их основе выполняется проверка равенства, составленного на основании теоремы косинусов для модулей векторов, уравнения (1):

$$U^2 = I_o^2 z_{об}^2 + E_0^2 + 2E_0 I_o z_{об} \sin(z + \varphi_{об}) = \sum U^2$$

где  $\varphi_{об} = \arctg \frac{X_p}{R}$  - аргумент комплексного сопротивления обмотки;

$z_0 = \sqrt{R^2 + X_p^2}$  - модуль комплексного сопротивления обмотки;

$z = \arctg \frac{I_{oa}}{I_{op}}$  - Угол сдвига между векторами  $I_o$  и  $\Phi_{om}$ ;

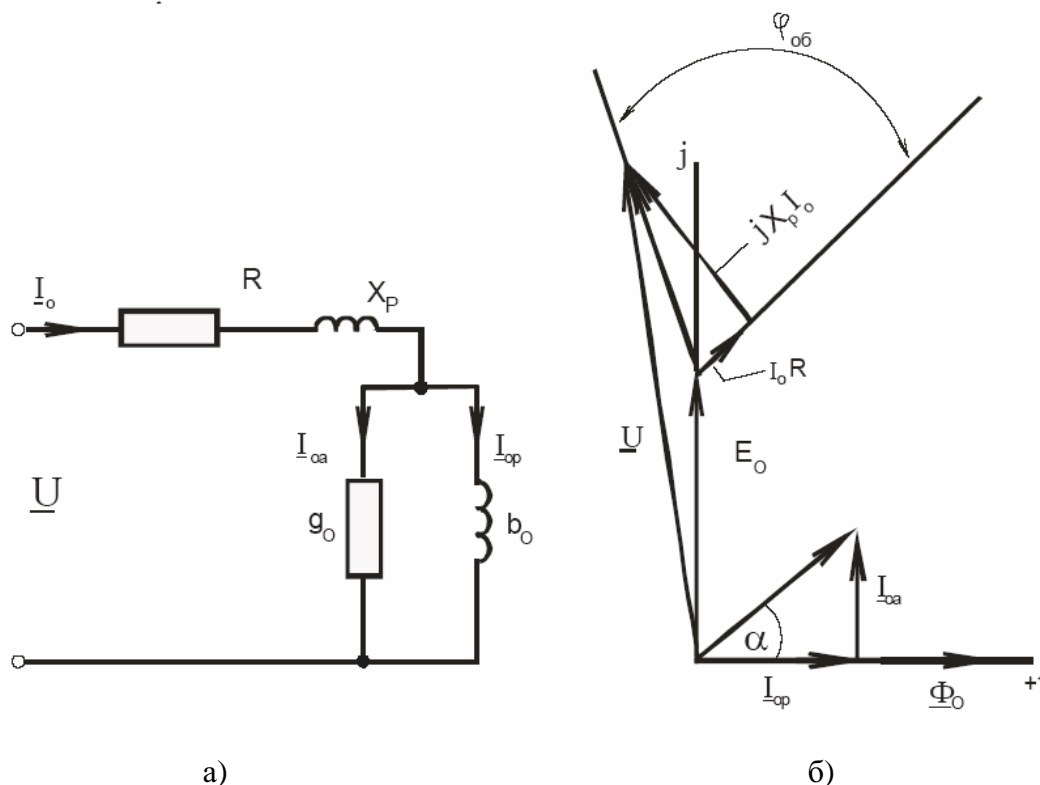


Рис. 2 Схема замещения и векторная диаграмма магнита (дресселя)



Разумеется, что при  $w_{расч}$  равенства между правой и левой частью принципиально не может быть. Поэтому расчет следует продолжить при  $w = 0,9 w_{расч}, 0,8 w_{расч}$  и т.д. По результатам расчета строится зависимость правой части  $\sum U^2$  функции число витков  $w$  (см. рис.3). Затем на оси ординат откладывается значение  $U^2$  и проводится линия, параллельная оси абсцисс. Перпендикуляр, опущенный из точки пересечения этой линии с расчетной кривой на ось абсцисс, и даст искомое значение  $w$ , а соответственно с ним определится и величина м.д.с.  $I_0 w$ .

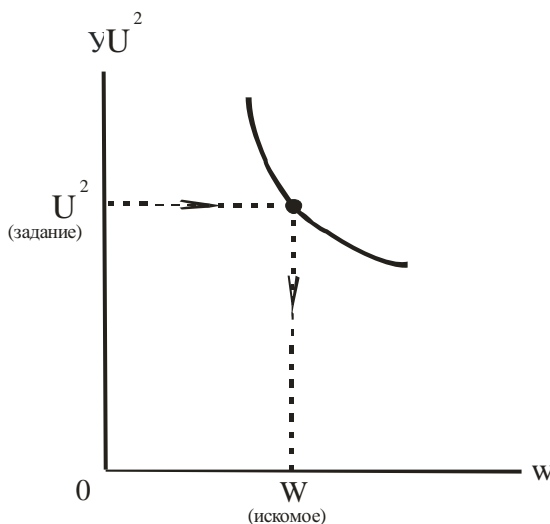


Рис. 3 Иллюстрация к методу поиска искомого значения  $W$ .

При известном  $w$  можно дать ответ на вопрос о сечении провода  $q$  под обмотку и его диаметре  $d_{np}$ , используя соотношения:

$$q = \frac{K_3 \cdot Q_{об}}{w}; \quad d_{np} = 2 \sqrt{\frac{q}{\pi}}$$

где  $K_3$  - коэффициент заполнения обмотки.

Затем вся обмотка проверяется на критерий обеспечения допустимой температуры нагрева  $\theta_{доп}$  по рекомендациям, изложенным в [5]

Перейдем к анализу работы того же электромагнита при замкнутом положении ключа  $K$ , т.е. при наличии короткозамкнутой обмотки. В таком случае устройство представляет собой обычный трансформатор в режиме к.з., поведение которого описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= I_1 R_1 + jX_{p1} I_1 + \underline{E}_0; \\ \underline{E}_k &= I_k (R_k + jX_k); \\ \underline{I}_1 w_1 &= \underline{I}_0 w_1 + I_k w_k \end{aligned}$$

где  $U_1, I_1$  - напряжение и ток обмотки, подключенной к зажимам источника (назовем ее первичной);

$R_1, X_{p1}$  - активное и индуктивное сопротивление рассеяния той же первичной обмотки;

$R_k, X_k$  - активное и индуктивное сопротивление рассеяния короткозамкнутой (вторичной) обмотки;

$E_k$  - э.д.с., наводимая во вторичной обмотке основным магнитным потоком;

$I_1 w_1, I_k w_k$  - м.д.с. соответственно первичной и вторичной обмоток;

$I_0 w_1$  - м.д.с. первичной обмотки при отсутствии вторичной.

$w_1, w_k$  - число витков первичной и короткозамкнутой обмотки.

После выполнения операции приведения та же система уравнений трансформатора переписывается в виде:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + jX_{p1} \underline{I}_1 + \underline{E}_0;$$

$$\underline{E}'_k = \underline{I}'_k (R'_k + jX'_k);$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_k$$

где  $E'_k, I'_k, R'_k, X'_{pk}$  - приведенные к числу витков первичной обмотки значения  $E_k, I_k, R_k$  и  $X_{pk}$ .

Последней системе уравнений соответствует схема замещения и векторная диаграмма, приведенные на рис. 4.

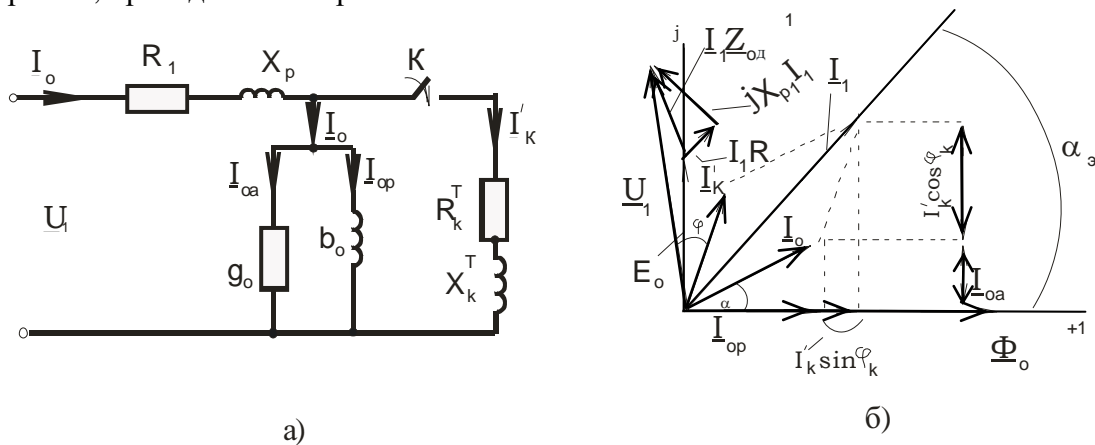


Рис. 4 Схема замещения и векторная диаграмма электромагнита с к.з. обмоткой

Из сопоставления схем замещения рис.2 и 4 следует, что они отличаются друг от друга только наличием ветви с последовательно включенными сопротивлениями  $R'_k$  и  $X'_{pk}$ , которая, естественно, оказывает влияние на показатели работы первичной цепи. В частности она вызывает увеличение тока  $I_1$ , значение которого согласно векторной диаграмме рис. 4б определяется соотношением:

$$I_1 = \sqrt{(I_{op} + I'_k \sin \varphi_k)^2 + (I_{oa} + I'_k \cos \varphi_k)^2}$$

где ток  $I'_k$  и аргумент полного комплексного сопротивления вторичной обмотки  $\varphi_k$  рассчитываются по формулам:

$$I'_k = \frac{E'_k}{\sqrt{R'^2_k + X'^2_{pk}}}; \quad \varphi_k = \arctg \frac{X'_{pk}}{R'_k}.$$

Методика расчета числа витков  $w = w_1$  тем не менее, здесь полностью сохраняется, лишь в уравнении баланса квадратов напряжений, записанных на основании теоремы косинусов, аргумент  $\alpha$  меняется на  $\alpha_3$  вычисляемый по соотношению:

$$\alpha_3 = \arctg \frac{I_{oa} + I_k' \cos \varphi_k}{I_{op} + I_k' \sin \varphi_k}.$$

Из конструктивных соображений к.з.обмотка часто выполняется в виде латунной или медной гильзы, т.е. с  $W_k = I$ . В таком случае величина  $X_k$  пренебрежимо мала и формула для токов  $I_1, I_k'$  и аргумента  $\alpha_3$  получают предельно простой вид:

$$I_1 = \sqrt{I_{op}^2 + (I_{oa} + I_k')^2}; \quad I_k' = \frac{E_k'}{R_k}; \quad \alpha_3 = \arctg \frac{I_{oa} + I_k'}{I_{op}}.$$

В работе [5] на основании сходства токов  $I_{oa}$  и  $I_k$  по характеру действия дано вполне логичное предложение, что потери в стали можно рассматривать, как потери в некоторой фиктивной к.з.обмотке, содержащей только активное сопротивление. Это привело к необходимости введения понятий активного, реактивного и комплексного магнитного сопротивления и обоснования методики их расчета. В нашем случае изложение указанного материала становится ненужным в связи с законченностью анализа.

Для снижения пульсации силы тяги на практике часто поступают так, что к.з.виток охватывает лишь часть площади торца магнитопровода, т.е. одна из его сторон находится в специально выполненном пазу. В таком случае для удобства анализа и расчета конфигурацию магнитной цепи целесообразно представить в виде совмещения дросселя и трансформатора, сердечники которых находятся под действием одной м.д.с. (см. рис.5).

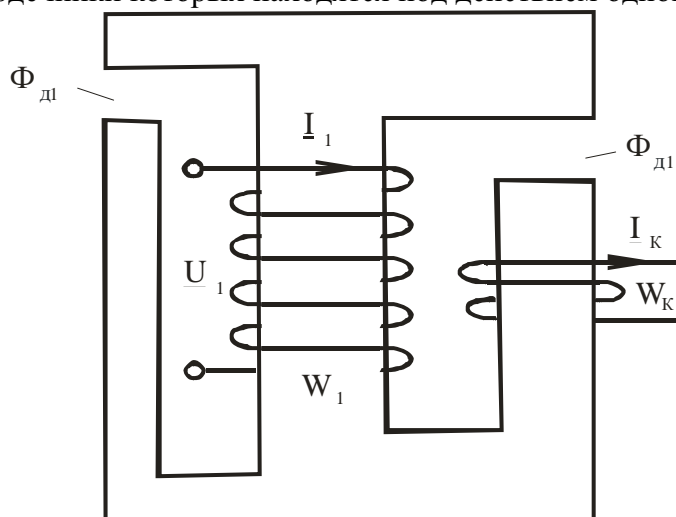


Рис. 5 Конфигурация магнитной цепи при совмещении дросселя и трансформатора.

Тогда получится схема замещения, приведенная на рис.6. Поскольку в дросселе магнитный поток  $\Phi_{\delta 1}$  и ток  $I_{o1}$  сдвинуты на угол  $\alpha$ , а в трансформаторе угол между  $\Phi_{\delta 2}$  и  $I_1$  равен  $\alpha_3$ , то при одной и той же м.д.с.  $I_1 w_1$  сдвинутыми между собой на угол  $\theta = \alpha_3 - \alpha_1$  окажутся магнитные потоки  $\Phi_{\delta 1}$  и  $\Phi_{\delta 2}$  (см.рис.7). Каждый из этих потоков создаст свою силу тяги, соответственно  $p_1$  и  $p_2$ . Их мгновенные значения запишутся:

$$p_1 = P_{cp1} - P_{cp1} \cos 2\omega t$$

$$p_2 = P_{cp2} - P_{cp2} \cos(2\omega t - 2\theta)$$

где  $P_{cp1} = \frac{B_{\delta_1}^2 S_1}{2\mu_0}$ ;  $P_{cp2} = \frac{B_{\delta_2}^2 S_2}{2\mu_0}$

$B_{\delta_1}, B_{\delta_2}$  - магнитные индукции в зазорах дросселя и трансформатора;

$S_1, S_2$  - площадь соответственно в дросселе и трансформаторе.

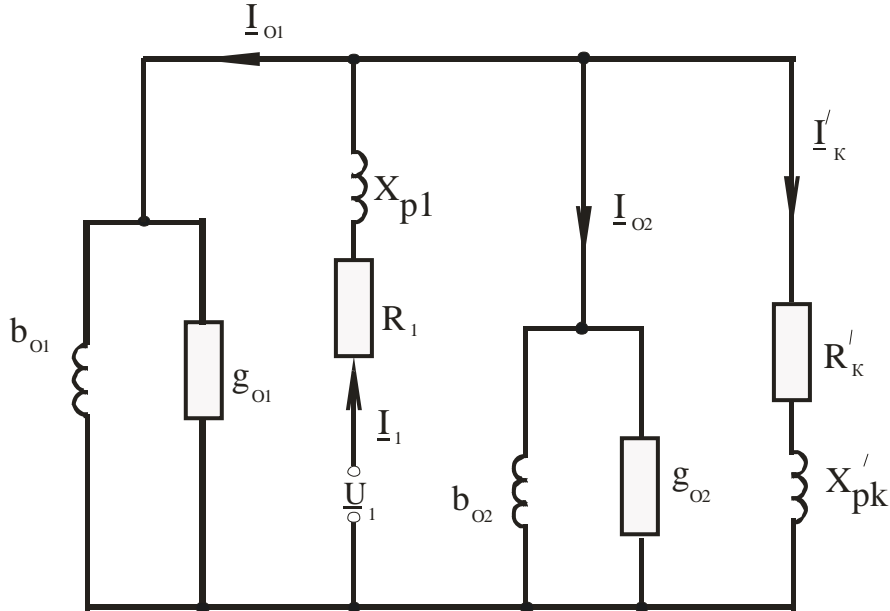


Рис.6 Расчетная схема замещения

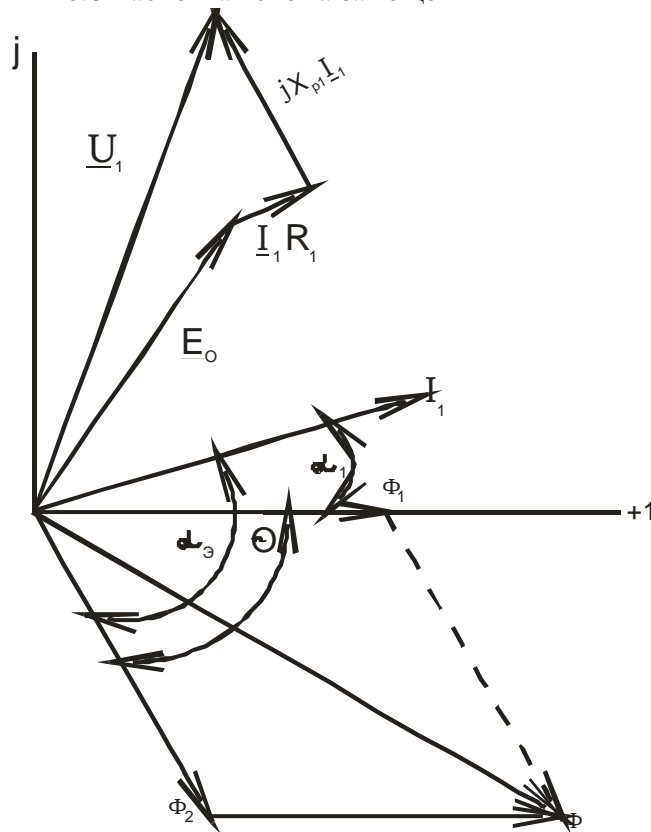


Рис.7 Векторная диаграмма электромагнита с к.з. витком в расщепленном полюсе

Результирующая сила  $p$ , действующая на якорь, равна сумме  $p_1$  и  $p_2$ , т.е.  $p = p_1 + p_2$ . Это означает, что результирующее усилие пульсирует, но не от максимума до нуля, как ее составляющие, а от максимального усилия  $P_{МАК}$  до минимального  $P_{МИН}$ , которое больше нуля. Для определения  $P_{МАК}$  и  $P_{МИН}$  исследуем функцию  $p$  на экстремум по переменной  $t$ , полагая  $P_{cp1} = P_{cp2} = P_{cp}$ , что в принципе можно обеспечить за счет варьирования  $B_{\delta_1}, B_{\delta_2}, S_1$  и  $S_2$ . В итоге получим, что экстремумы имеют место при условии:  $2\omega t = \theta + \pi n$  где  $n$  - номера полупериодов. Подстановкой этого условия в выражение для  $p$  получим:

$$P_{МИН} = 2P_{cp}(1 - \cos \theta), \quad P_{МАК} = 2P_{cp}(1 + \cos \theta).$$

Очевидно, что при  $\theta = 90^\circ$  будет выполнено равенство  $P_{МИН}$  и  $P_{МАК}$ , т.е. пульсации исчезнут. Но, чтобы добиться такого результата нужно обеспечить равенство потерь в стали нулю и чисто активное сопротивление к.з. витка при отсутствии намагничивающего тока. Практических решений на этот счет нет, и потому реально достижимые значения угла  $\theta$  лежат в пределах  $55 \div 65^\circ$ . Следовательно, отношение  $P_{МАК}$  к  $P_{МИН}$  равно примерно трем, а амплитуда переменной составляющей пульсации не превышает  $P_{cp}$ . Разумеется, что для обеспечения надежной работы электромагнита  $P_{МИН}$  должно быть больше усилия возвратной пружины.

Таким образом, базируясь на положения ТОЭ по вопросу анализа дросселей и трансформаторов, можно построить анализ электромагнитов переменного тока в простой, компактной форме, сохраняя системность и преемственность и устраняя излишние искусственные построения.

It is shown in work, that examining the electromagnets of alternating current within the framework of single family of such electrical engineering devices, as throttles and transformers, it is possible to build their analysis in a simple and compact form. The same is achieved communication of such scientific directions, as the "Electric vehicles" and TBE on the basis of principles of the system and succession.

1. Буль Б.К. и др. Основы теории электрических аппаратов. Под ред. Г.В. Буткевича. -М.: "Высшая школа", 1970, 600 с.
2. Марков З.Т. Судовые электрические аппараты. -Л..«Судостроение»:1971, 390 с.
3. Новиков И.Н., Теория и расчет электрических аппаратов. -Л.:«Энергия», 1970,328 с.
4. 4-. Таев И.С. и др. Основы теории электрических аппаратов. -М.: "Высшая школа", 1987, 352 с.
5. Чунихин А.А. Электрические аппараты. -М.: "Энергоатомиздат", 1988, 720 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. -М.:«Высшая школа», 1988,630 с.
7. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. -М.: "Энергия", 1975, 722 с.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ

Попруга А.Г.

**Цель исследований:** установить взаимосвязь между параметрами провода и коэффициентом полезного действия электрического нагревателя, предложить конструкцию нагревателя с повышенным коэффициентом полезного действия.

**Современный уровень:** данная работа является продолжением статьи [5] и посвящена разработке математической модели электрического нагревателя с целью уменьшения потерь энергии.

**Постановка задачи исследований:** разработать математическую модель электрического нагревателя и экспериментально подтвердить ее адекватность.

### Теоретическая часть:

Пусть энергия подается к нагревателю, изготовленному из нихромовой проволоки круглого сечения с сопротивлением  $Z_H$ :

$$Z_H = R_H + j \omega L_H, \quad (1)$$

где  $L_H$  – индуктивность провода нагревателя;  $R_H$  – активное сопротивление провода нагревателя;  $\omega$  – угловая частота.

При прохождении тока по линии передачи и нагревателю в каждом участке этих проводников выделяется тепло. Электрическая энергия транспортируется от источника к нагревателю по диэлектрику вдоль проводов линии передачи.

Провода в линиях передачи выполняют двойную роль: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике.

Для характеристики плотности потока энергии в теории Максвелла вводится вектор Пойнтинга – Умова  $\vec{P}$ , который равен векторному произведению векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ :

$$\vec{P} = [\vec{E} \times \vec{H}] \quad (2)$$

где  $\vec{H}, \vec{E}$  – напряженности магнитного и электрического полей на поверхности провода нагревателя соответственно.

Если величина вектора Пойнтинга положительна, то энергия поступает в провод нагревателя из внешнего пространства и идет на изменение магнитного поля в объеме провода и на выделение теплоты в нем. Если вектор Пойнтинга имеет отрицательную величину, то поток энергии направлен от провода нагревателя в окружающее его пространство. При этом энергия, запасенная в магнитном поле в объеме провода, частично возвращается в окружающее провод пространство и частично преобразуется в теплоту.

Такие колебания с частичным возвратом энергии в пространство, окружающее провод, можно рассматривать как результат наличия внутреннего реактивного сопротивления  $X_H$  провода нагревателя.

Как известно, между реактивным  $X_H$  и активным  $R_H$  сопротивлениями цепи и разностью фаз  $\varphi$  между напряжением и током в этой цепи существует соотношение[4]:

$$\operatorname{tg} \varphi = X_H / R_H \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что для уменьшения фазового сдвига  $\varphi$  между напряжением и током в нагревателе необходимо уменьшать реактивное сопротивление  $X_H = \omega L_H$  и увеличивать активное сопротивление  $R_H$  нагревателя.

Протекание тока по электрической цепи нагревателя сопровождается потреблением энергии от источника. Скорость поступления энергии характеризуется мощностью. Нагреватель потребляет от источника мощность  $P_{\Pi}$ :

$$P_{\Pi} = U \cdot I \quad (4)$$

Непосредственно в виде теплоты в нагревателе выделяется мощность  $P_H$ :

$$P_H = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия нагревателя:

$$\eta_H = P_H / P_{\Pi} = U \cdot I \cdot \cos\varphi / U \cdot I = \cos\varphi \quad (6)$$

Таким образом, представляется целесообразным рассмотреть теорему Пойнтинга - Умова в комплексной форме с целью определения активного и внутреннего индуктивного сопротивлений провода нагревателя.

В теории Максвелла доказывается, что вектор Пойнтинга  $\vec{\Pi}$  совпадает с направлением движения энергии электромагнитного поля, а его величина равна количеству энергии проходящей за 1сек. через единичную площадку нормальной направлению переноса. Вектор Пойнтинга имеет размерность мощности  $[B \cdot A / M^2]$  или энергии в единицу времени, отнесенной к единице поверхности.

При синусоидальных сигналах  $E$  и  $H$  можно записать:

$$H = H_m \sin(\omega t + \varphi_H) \quad (7)$$

$$E = E_m \sin(\omega t + \varphi_E) \quad (8)$$

При переходе от действительной синусоидальной функции (оригинала) к изображающей комплексной величине получим:

$$H_m \sin(\omega t + \varphi_H) \rightarrow H_m e^{j(\omega t + \varphi_H)} = \dot{H}_m e^{j\omega t} \quad (9)$$

$$E_m \sin(\omega t + \varphi_E) \rightarrow E_m e^{j(\omega t + \varphi_E)} = \dot{E}_m e^{j\omega t} \quad (10)$$

Комплексный вектор Пойнтинга определим как:

$$\dot{\vec{\Pi}} = \left[ \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}} \right] \quad (11)$$

обозначения  $\dot{\vec{E}}$  и  $\dot{\vec{H}}$  означают, что напряженности  $E$  и  $H$  изменяются по синусоидальному закону и являются векторными функциями;

Активное и внутреннее индуктивное сопротивление проводников при переменном токе определяется с помощью комплексного вектора Пойнтинга:

$$-\oint_s \dot{\vec{\Pi}} d\vec{S} = P + jQ = I^2 R_H + jI^2 X_H = I^2 Z_H \quad (12)$$

Откуда:

$$Z_H = R_H + jX_H = -\frac{\oint \dot{I} d\vec{S}}{I^2} \quad (13)$$

Для установления взаимосвязи между током  $\dot{I}$ , напряженностью магнитного поля  $\dot{H}$  и напряженностью электрического поля  $\dot{E}$  рассмотрим распределение тока в цилиндрическом проводе круглого сечения.

В соответствии с законом Ома в дифференциальной форме:

$$\dot{J} = \gamma \dot{E} \quad , \quad (14)$$

где  $\dot{J}$  - плотность тока, направленная по напряженности электрического поля;  $\gamma$  - удельная проводимость материала провода нагревателя.

Соотношение (14) устанавливает связь между плотностью тока в данной точке проводящей среды и напряженностью поля в этой же точке [3].

Первое и второе уравнения Максвелла для проводящей среды имеют вид:

$$\text{rot } \dot{H} = \gamma \dot{E} \quad (15)$$

$$\text{rot } \dot{E} = -j\omega\mu_a \dot{H} \quad , \quad (16)$$

где  $\mu_a$  - магнитная проницаемость материала провода нагревателя.

Умножим правую и левую часть (16) на  $\gamma$  и с учетом (14) получим:

$$\text{rot } \dot{H} = \dot{J} \quad (17)$$

$$\text{rot } \dot{J} = -j\omega\mu_a \gamma \dot{H} \quad (18)$$

Возьмем ротор от уравнения (18):

$$\text{rot rot } \dot{J} = \text{grad div } \dot{J} - \nabla^2 \dot{J} = -j\omega\mu_a \gamma \dot{J} \quad (19)$$

В установившемся режиме:

$$\text{div } \dot{J} = 0$$

Поэтому:

$$\nabla^2 \dot{J} = j\omega\mu_a \gamma \dot{J} \quad (20)$$

Раскроем  $\nabla^2 \dot{J}$  в цилиндрической системе координат:

$$\frac{d^2 \dot{J}_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{J}_m}{dr} = j\omega\mu_a \gamma \dot{J}_m \quad (21)$$



Введением новой переменной:

$$X=r\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma} \quad (22)$$

Уравнение (21) преобразуется к виду:

$$\frac{d^2\dot{J}_m}{dX^2} + \frac{1}{X} \frac{d\dot{J}_m}{dX} + \dot{J}_m = 0 \quad (23)$$

Уравнение (23) является частным случаем уравнения Бесселя [1].

Решение уравнения (23) можно записать следующим образом:

$$\dot{J}_m = AJ_0(X) + BN_0(X) \quad (24)$$

где  $A$  и  $B$  - постоянные интегрирования;  $J_0(X)$  – функция Бесселя нулевого порядка первого рода;  $N_0(X)$  – функция Бесселя нулевого порядка второго рода.

Постоянные  $A$  и  $B$  определяются из граничных условий при  $r = 0$  и  $r = R$ , т.е. при  $X = 0$  и  $X=R\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}$

Функция  $N_0(X)$  обладает той особенностью, что при  $X = 0$  (т.е. на оси провода при  $r = 0$ ) она обращается в бесконечность. Но из физических соображений ясно, что  $\dot{J}$  на оси провода не может иметь бесконечно большое значение, поэтому слагаемое  $BN_0(X)$  в решении (24) отбрасываем (принимая  $B = 0$ ). Следовательно:

$$\dot{J}_m = AJ_0(X) \quad (25)$$

Функцию  $J_0(X)$  можно представить в виде ряда:

$$J_0(X) = 1 - \frac{X^2}{2^2} + \frac{X^4}{(2 \cdot 4)^2} - \frac{X^6}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(K!)^2} \left(\frac{X}{2}\right)^{2k} \quad (26)$$

Постоянная  $A$  равна комплексной амплитуде плотности тока  $\dot{J}_{m0}$  на оси провода. Следовательно:

$$\dot{J}_m = \dot{J}_{m0} J_0(X) = \dot{J}_{m0} b_0 e^{j\beta_0} \quad (27)$$

Функция  $J_0(X)$  есть комплексное число, так как  $X$  в соответствии с (22) является комплексным числом. Через  $b_0$  обозначен модуль, а через  $\beta_0$  - аргумент комплексного числа  $J_0(X)$  [2].

Напряженность магнитного поля может быть получена из уравнения:

$$\frac{d\dot{J}_m}{dr} = j\omega\mu\dot{H}_m \quad (28)$$

Откуда:

$$\dot{H}_m = \frac{1}{j\omega\mu_a\gamma} \frac{d\dot{J}_m}{dr} \quad (29)$$

Подставим (22) в (29) и после несложных преобразований получим:

$$\dot{H}_m = \frac{\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma} dJ_m}{j\omega\mu_a\gamma dX} = \frac{j_{m0}}{\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}} \left( -\frac{dJ_0(X)}{dX} \right) \quad (30)$$

Дифференцируя ряд (26) находим:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{m0} &= \frac{j_{m0}}{\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}} \left( \frac{X}{2} - \frac{X^3}{2^2 \cdot 4} + \frac{X^5}{(2 \cdot 4)^2 \cdot 6} - \frac{X^7}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2 \cdot 8} + \dots \right) = \\ &= \frac{j_{m0}}{\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}} J_1(X) = \frac{j_{m0}}{\sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}} b_1 e^{j\beta_1} \end{aligned} \quad (31)$$

Через  $b_1$  обозначен модуль, а через  $\beta_1$  – аргумент комплексного числа  $J_1(X)$ .

По аналогии с (26) представим  $J_1(X)$  в виде:

$$J_1(X) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(1+k)!} \left( \frac{X}{2} \right)^{1+2k} \quad (32)$$

Комплексное сопротивление  $Z$  провода нагревателя длиной  $L$  определится выражением [3]:

$$Z = \frac{b_0 e^{j\beta_0} L \sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}}{\gamma b_1 e^{j\beta_1} 2\pi R} = \frac{e^{j45^\circ} b_0 e^{j\beta_0} L \sqrt{j\omega\mu_a\gamma}}{2\pi R \gamma b_1 e^{j\beta_1}} \quad (33)$$

Уравнение (33) можно переписать в другой форме:

$$Z = \frac{b_0 \sqrt{\omega\mu_a\gamma}}{b_1 2\pi R \gamma} \left[ \cos(\beta_0 - \beta_1 - 45^\circ) + j \sin(\beta_0 - \beta_1 - 45^\circ) \right] \quad (34)$$

Откуда следует:

$$R_n = \frac{b_0 \sqrt{\omega\mu_a\gamma}}{b_1 2\pi R \gamma} \cos(\beta_0 - \beta_1 - 45^\circ) \quad (35)$$

$$X_n = \frac{\sqrt{\omega\mu_a\gamma}}{2\pi R \gamma} \frac{b_0}{b_1} \sin(\beta_0 - \beta_1 - 45^\circ) \quad (36)$$

После подстановки (22) в (26) и (32) и с учетом того, что  $\sqrt{-j} = e^{-j45^\circ}$  определим для ряда значений  $R\sqrt{\omega\mu_a\gamma}$  модули  $b_0, b_1$  и аргументы  $\beta_0, \beta_1$  функций Бесселя, а также  $\operatorname{tg}\varphi, \cos\varphi$ , где  $\varphi = \beta_0 - \beta_1 - 45^\circ$  где  $\varphi$  – угол, на который запаздывает по фазе напряженность магнитного поля относительно напряженности электрического поля на поверхности провода. Результаты вычислений приведены в табл.1.

Таблица 1.

$R\sqrt{\omega\mu_a\gamma}$	$b_0$	$\beta_0$	$b_1$	$\beta_1$	$\text{tg}\varphi$	$\text{cos}\varphi$
0.1	1	0.143	0.049	-44.977	0.0021	1
0.2	1	0.573	0.1	-44.576	0.0026	1
0.3	1	1.261	0.15	-44.462	0.0126	0.9999
0.4	1.001	2.292	0.2	-44.003	0.0226	0.9997
0.5	1.001	3.558	0.25	-43.201	0.0307	0.9995
0.6	1.002	5.157	0.3	-42.284	0.0426	0.9991
0.7	1.003	6.99	0.35	-41.539	0.0617	0.9981
0.8	1.007	9.167	0.401	-40.451	0.0808	0.9968
0.9	1.01	11.516	0.451	-39.248	0.1009	0.9949
1	1.015	14.267	0.502	-37.873	0.1253	0.9922
2	1.229	52.254	1.041	-16.73	0.4449	0.9137
3	1.951	96.52	1.8	+15.699	0.7218	0.8108
4	3.439	138.21	3.173	+53.915	0.8183	0.7733
5	6.231	178.911	5.809	+93.552	0.8498	0.7620
6	11.501	219.649	10.85	+133.43	0.8760	0.7522
7	21.547	260.271	20.5	+173.526	0.8924	0.7461
8	40.818	300.928	39.07	+213.69	0.9080	0.7404
9	77.957	341.493	74.974	+253.957	0.9175	0.7369
10	149.85	382.12	144.67	+294.293	0.9269	0.7334

**Экспериментальная часть:**

С целью практического подтверждения полученных теоретических результатов был проведен эксперимент с использованием шестиплечного моста (рис.1)

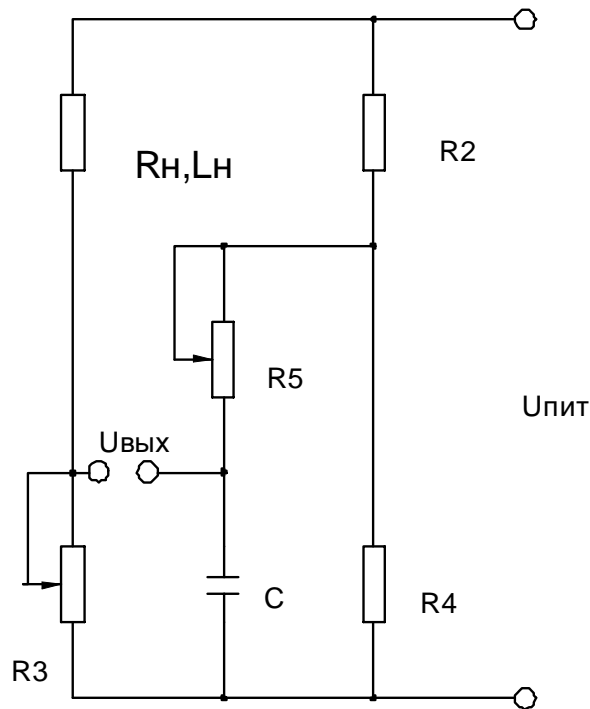


Рис.1

Измерению подвергались два провода, изготовленные из нихрома диаметром 0.1мм и 0.4мм. Указанные провода длиной 1м поочередно подключались к мостовой схеме изображенной на рис.1.

Измерения проводились цифровым мультиметром модели ЕС890D, который подсоединялся к клеммам  $U_{\text{вых.}}$  мостовой схемы.

а) Измерение активного, индуктивного сопротивлений и удельной проводимости нихромового провода

При измерении активного сопротивления  $R_n$  и индуктивности  $L_n$  провода диаметром 0.4мм использовались такие элементы мостовой схемы:  $R_2, R_4$  - МЛТ-0.25 номиналом 360 Ом,  $C$  - К73-17 номиналом 0.47 мкФ,  $R_3$  - СП5-15 номиналом 10 Ом,  $R_5$  - СП5-15 номиналом 10 Ом. Питание мостовой схемы  $U = 8В, 50 Гц$ . Результаты измерения следующие:  $R_n = 9.5 Ом, L_n = 1.64 \cdot 10^{-3} Гн$ .

Используя выражение:

$$R_n = \frac{\ell}{\gamma \cdot \pi \cdot R^2} \quad (37)$$

Определим  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{1}{9.5 \cdot \pi \cdot (0.2 \cdot 10^{-3})^2} = 8.377 \cdot 10^5 \frac{См}{м}$$

При аналогичных измерениях нихромового провода диаметром 0.1мм в мостовой схеме использовался резистор  $R_3$  - СП5-15 номиналом 220 Ом. Результаты измерений в этом случае такие:  $R_n = 133 Ом, L_n = 6.25 \cdot 10^{-3} Гн, \gamma = 9.573 \cdot 10^5 См/м$ .

б) Измерение абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_a$  нихромового провода.

Индуктивность  $L_n$  нихромового провода определяется абсолютной магнитной проницаемостью,  $\mu_a$  нихрома и геометрическими размерами провода.

Индуктивность  $L_n$  нихромового провода длиной  $l$  выражается формулой:

$$L_n = \frac{\mu_a \cdot l}{8 \cdot \pi} \quad (38)$$

Формула (38) справедлива только при условии равномерного распределения тока по сечению провода, т.е. только при постоянном токе.

Схема установки для испытания нихромового провода, с целью определения абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_a$ , приведена на рис.2.

Испытанию подвергались два нихромовых провода диаметром 0.4мм и 0.1мм.

Нихромовые провода последовательно закреплялись на специальной линейке длиной 1м. С помощью переключателя  $S1$ , типа П1Т-1-1, на провод диаметром 0.1мм подавалось напряжение 13.3В, сопротивление  $R_n$  выбиралось равным 1Ом. Падение напряжения на  $R_n$  измерялось с помощью осциллографа С1-97, и фиксировалась постоянная времени  $\tau$  установления тока  $I$  в цепи,  $\tau = 0.05 \cdot 10^{-3} с$ .

В результате определяем  $L_n$ :

$$L_n = \tau \cdot R_n = 0.05 \cdot 10^{-3} \cdot 133 = 6.65 \cdot 10^{-3} Гн.$$

а из выражения (38) определяем  $\mu_a$ :

$$\mu_a = 6.65 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot \pi = 0.167.$$

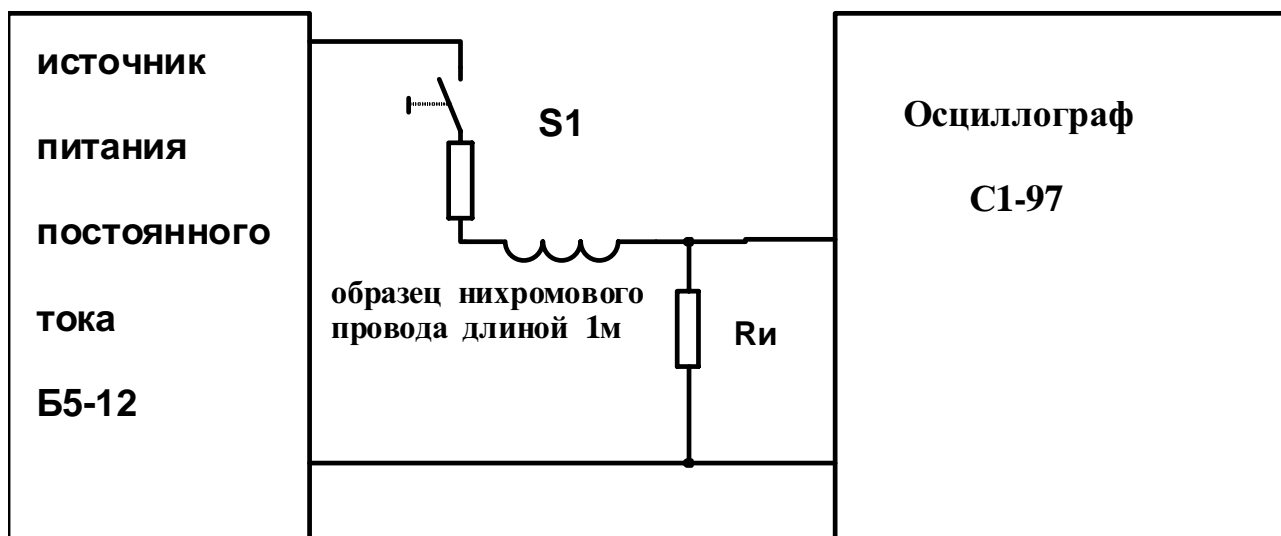


Рис. 2

Аналогично на провод диаметром 0.4мм подавалось напряжение 9.5В, сопротивление  $R_{и}$  выбиралось равным 0.1 Ом. Постоянная времени установления тока  $I$  в цепи для этого случая  $\tau = 0.2 \cdot 10^{-3}$  с.

Индуктивность  $L_{н}$  и абсолютная магнитная проницаемость,  $\mu_a$  для этого случая равны:

$$L_{н} = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 9.5 = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

$$\mu_a = 1.9 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot \pi = 0.048.$$

в) Проверка адекватности теоретических результатов и экспериментальных данных

Для провода диаметром 0.4мм на основании экспериментальных данных определим величину:

$$R \sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_a} = R \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8.377 \cdot 10^5 \cdot 0.048} = 0.711$$

Далее по формуле (26) определим  $J_0(X)$ :

$$J_0(X) = \sum_{k=0}^{80} \frac{(-1)^k}{(k!)^2} \left( \frac{0.711}{2} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} \right)^{2k} = 0.996 + j0.126$$

Вычисляем коэффициенты  $b_0, \beta_0$ :

$$b_0 = \sqrt{0.996^2 + 0.126^2} = 1.004$$

$$\beta_0 = \operatorname{atan}\left(\frac{0.126}{0.996}\right) = 7.219^\circ$$

Вычисляем по формуле (32)  $J_1(X)$ :

$$J_1(X) = \sum_{k=0}^{80} \frac{(-1)^k}{k! \cdot (1+k)!} \cdot \left(\frac{0.711}{2} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}}\right)^{2k+1} = 0.267 - j0.235$$

Вычисляем коэффициенты  $b_1, \beta_1$ :

$$b_1 = \sqrt{0.267^2 + 0.235^2} = 0.356$$

$$\beta_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{-0.235}{0.267}\right) = -41.368^\circ$$

По формулам (35),(36) вычисляем  $R_n, X_n$ :

$$R_n = \frac{3554 \cdot 1.004}{2 \cdot \pi \cdot 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 8.377 \cdot 10^5 \cdot 0.356} \cdot 0.998 = 9.502 \text{ Ом}$$

$$X_n = \frac{3554 \cdot 1.004}{2 \cdot \pi \cdot 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 8.377 \cdot 10^5 \cdot 0.356} \cdot 0.063 = 0.6 \text{ Ом}$$

Вычислим значение индуктивности  $L_n$ :

$$L_n = \frac{0.6}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.91 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Аналогично проведем расчет для провода диаметром 0.1мм:

$$R \sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_a} = R \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9.573 \cdot 10^5 \cdot 0.167} = 0.354$$

$$J_0(X) = \sum_{k=0}^{80} \frac{(-1)^k}{(k!)^2} \cdot \left(\frac{0.354}{2} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}}\right)^{2k} = 1 + j0.031$$

$$b_0 = \sqrt{1^2 + 0.031^2} = 1$$

$$\beta_0 = \operatorname{atan}\left(\frac{0.031}{1}\right) = 1.776^\circ$$

$$J_1(X) = \sum_{k=0}^{80} \frac{(-1)^k}{k! \cdot (1+k)!} \cdot \left(\frac{0.354}{2} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}}\right)^{2k+1} = 0.127 - j0.123$$

$$b_1 = \sqrt{0.127^2 + 0.123^2} = 0.177$$

$$\beta_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{-0.123}{0.127}\right) = -44.06^\circ$$

$$R_n = \frac{7087 \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 10^{-3} \cdot 9.573 \cdot 10^5 \cdot 0.177} \cdot 1 = 133.135 \text{ Ом}$$

$$X_n = \frac{7087 \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 10^{-3} \cdot 9.573 \cdot 10^5 \cdot 0.177} \cdot 0.015 = 1.997 \text{ Ом}$$

$$L_n = \frac{1.997}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 6.357 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

**Выводы:**

1. В работе предложена математическая модель для исследования электрических нагревателей из различных материалов и сечений с высокой степенью адекватности практическим результатам.
2. С целью повышения коэффициента полезного действия электрический нагреватель необходимо изготавливать из системы параллельно соединенных нагревателей малого сечения.

In article on the basis of theory Maxwell, theorem Pointing-Umov, the equation and functions Bessel the mathematical model is developed for definition active and internal inductive resistance of a cylindrical wire of a heater. For confirmation of adequacy of mathematical model results of experiments by definition of active, inductive resistance, magnetic permeability, specific conductivity nichrom wires of two various diameters are resulted.

1. Несис Е.И. Методы математической физики.- М.: Просвещение, 1977.- 199с.
2. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям.-М.: Наука, 1979.- 832с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле.- М.: Высш. школа,1978.-231с.
4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С Теоретические основы электротехники. Том 2.- Л.: Энергоиздат,1981.- 416с.
5. Попруга А.Г. Усовершенствование электрических нагревателей по критерию экономии энергии // Вестник Херсонского национального технического университета.- 2003.-№ 2(12).- С. 142-145.

## УРАХУВАННЯ МОРФОГЕНЕТИЧНОГО РІВНЯННЯ В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ТКАНИНИ

Тернова Т.І.

**Вступ.** Підвищення якісних показників продукції легкої і зокрема текстильної промисловості зв'язано з кількісним і якісним розвитком її техніки і технології. Для успішного управління і контролю технологічними процесами і їхньої оптимізації широко застосовують методи технічної кібернетики. До числа цих методів у першу чергу відносяться методи математичного моделювання технологічних процесів, що включають методи одержання математичних моделей і їхнє дослідження.

**Постановка проблеми.** Тканина як об'єкт дослідження характеризується великим числом взаємозалежних факторів, наявністю істотних неконтрольованих збурювань і помилок виміру окремих факторів і випадковою зміною в часі характеристик. Тому її можна віднести до категорії складних об'єктів текстильної промисловості [1, 2].

Наявність математичної моделі об'єкта й алгоритму управління процесом забезпечує умови для більш швидкого інженерного конструювання раціональної системи автоматичного регулювання технологічного процесу, створення системи автоматичного технічного контролю процесів і управління агрегатами і потоковими лініями. Знаючи математичну модель процесу або об'єкта, можна спрогнозувати властивості вихідного продукту, оцінити ступінь впливу вхідних факторів з метою розробки схеми контролю і стабілізації найбільше що сильно впливають факторів, а також здійснити оптимізацію процесу.

Відсутність математичної моделі і недостатнє знання динамічних властивостей об'єктів приводить до інтуїтивного управління процесом, що відповідно відображається на продуктивності машин і якості продукту, що випускається.

Недосконалі гіпотези про моделі процесів і об'єктів і відсутність повного урахування факторів, що визначають вхідні впливи і властивості об'єкта, приводять до відхилення прогнозованих характеристик від характеристик продукту, одержуваного в реальних об'єктах. Математична модель вважається адекватною об'єктові, якщо з достатньою точністю відбиває його поведінку, тобто зміну одного або декількох вихідних параметрів при варіюванні вхідних параметрів (факторів) у заздалегідь заданому діапазоні.

Одержання адекватної моделі тканини як об'єкта контролю, що враховує технологію одержання і топологію складного переплетення ниток, є актуальною проблемою при створенні автоматичних систем контролю й управління технологічно процесом і виробництвом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В основу математичного опису тканини, як об'єкту контролю структурних характеристик покладено підхід, який розроблено в працях професора, д.т.н. А.П.Храпливого [3, 4].

Для опису тканини з ваговою функцією  $f(x, y)$ , з огляду на періодичність по рапортам природно використовувати ряд Фур'є  $F\{f(x, y)\}$ . Тоді модель  $f(x, y)$  описується для кінцевого числа додатків ряду [3]:

$$\tilde{f}(x, y) \approx F^{-1}\{F\{f(x, y)\}\} \quad (1)$$

Таким чином, при продовженні по рапортам, полотнину тканини можливо описати для повного ряду відомим виразом [5]:

$$\tilde{f}(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} (a_{m,n} \cos nx \cos my + b_{m,n} \sin nx \cos my + c_{m,n} \cos nx \sin my + d_{m,n} \sin nx \sin my) \quad (2)$$



Врахувуючи ортогональність структури тканини модель вигідно розглядати не як гармоніки що описують відгук на хвилю з максимумами на  $nx + my = k\pi$  [5],

$$\cos(nx + my), \quad \sin(nx + my), \quad (3)$$

а як реакцію на взаємодію хвиль за напрямком осей X, Y [4]. При цьому опис представляється як взаємодія одиничних векторів пов'язаних із системою утокових і основних ниток, що більш відповідає поставленій задачі.

$$\vec{\varphi}_{nx} = \begin{bmatrix} \cos nx \\ \sin nx \end{bmatrix}, \quad \vec{\varphi}_{my} = \begin{bmatrix} \cos my \\ \sin my \end{bmatrix} \quad (4)$$

Тоді, як показано в роботах [3, 4] ядром є лінійний оператор, що відображає топологічні особливості об'єкту:

$$S = \begin{pmatrix} a_{m,n} & b_{m,n} \\ c_{m,n} & d_{m,n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Отже, модель тканини описується сумою білінійних форм [4], чим досягається збереження в моделі топологічних особливостей тканини:

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \vec{\varphi}_{nx} S \vec{\varphi}_{my} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \langle \vec{\varphi}_{nx}, S \vec{\varphi}_{my} \rangle \quad (6)$$

Зміна представлення моделі [4], дозволяє отримати більш простий запис елементів спектральних матриць  $S_{ij}$  [6]:

$$S_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_{12} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_{22} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

У даному представленні виділяється вплив рівноважної - парної складовий рапорту, не рівноважної - непарної складовий та взаємних впливів.

Застосування розподілу моделі на компоненти верхніх і нижніх бічних смуг дозволяє зберегти однаковість побудови моделі і фізичну інтерпретацію елементів моделі [6]:

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \left\{ \langle \vec{\varphi}_{nx}^+, S_{m,n}^+ \vec{\varphi}_{my}^+ \rangle + \langle \vec{\varphi}_{nx}^-, S_{m,n}^- \vec{\varphi}_{my}^- \rangle \right\} \quad (8)$$

При цьому як основній, так і утоковій системі ниток відповідають по два одиничних вектори:

$$\varphi_{nx}^+ = \begin{bmatrix} \cos n^+ x_1 \\ \sin n^+ x_1 \end{bmatrix}, \quad \varphi_{nx}^- = \begin{bmatrix} \cos n^- x_1 \\ \sin n^- x_1 \end{bmatrix}, \quad \varphi_{my}^+ = \begin{bmatrix} \cos m^+ y_1 \\ \sin m^+ y_1 \end{bmatrix}, \quad \varphi_{my}^- = \begin{bmatrix} \cos m^- y_1 \\ \sin m^- y_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Істотним моментом є можливість завдяки використанню представлення (8) описати явище формування в деформованих текстильних матеріалах регулярних структур переважаючих розміри рапорту [6]:

$$\begin{aligned} n^+ &= n_{11} + m_{21} = n\pi \frac{\beta_{22}}{|B|} \left( \frac{1}{L_x} + \frac{1}{L_{x1}} \right), & n^- &= n_{11} - m_{21} = n\pi \frac{\beta_{22}}{|B|} \left( \frac{1}{L_x} - \frac{1}{L_{x1}} \right) \\ m^+ &= m_{22} + n_{12} = m\pi \frac{\beta_{11}}{|B|} \left( \frac{1}{L_y} + \frac{1}{L_{y1}} \right), & m^- &= m_{22} - n_{12} = m\pi \frac{\beta_{11}}{|B|} \left( \frac{1}{L_y} - \frac{1}{L_{y1}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Отже, при деформації тканини в її структурі виникають більш великі, чим одиничний рапорт регулярні структури, що визначає зміну властивостей тканини в межах полотна. З іншої сторони вираження (10) дозволяє підкреслити вплив малих деформацій, як випадкового фактора.

Виходячи з аналізу останніх публікацій і розробок, можна зробити висновок, що існуючі в даний час математичні моделі не відображають повною мірою технологію одержання готової тканини.

**Ціллю статті** є уточнення математичної моделі тканини, що буде враховувати технологію одержання готової тканини і текстуру складного переплетення ниток.

**Технологічний процес з погляду одержання морфогенетичного рівняння.**

Доцільно одержати математичну модель контрольованої тканини виходячи з технології одержання готової тканини. Такий підхід дозволить враховувати всі структурні особливості тканини, що тією чи іншою мірою впливають на формування плоского зображення відсканованої ділянки рапорту для подальшого його контролю. Це особливо актуально для систем з елементами штучного інтелекту працюючих за принципом перевірки гіпотез. Такі системи добре розпізнають об'єкти, що знають у тім значенні, що знають, як вони улаштовані і яким чином можуть піддаватися деформаціям і перекручуванням. У цьому змісті, чим краще система знає внутрішню структуру об'єкта контролю, тим якісніше буде результат розпізнавання.

Іншою не менш важливою перевагою одержання математичної моделі тканини, що враховує технологію одержання складного переплетення ниток є можливість застосовувати її в технічних системах зору незалежно від конструктивних і фізичних особливостей датчиків. Тобто така модель враховує особливості одержання контрольованого зображення не тільки телевізійними системами, але і системами контролю фізичних полів, лазерними, інфрачервоними й ін. [7, 8]

Незважаючи на удавану простоту, процес формування тканини є складним. Принципова його сутність не залежить від виду вироблюваної тканини і типу ткацького верстата, на якому вона виробляється [9-11]. Сутність процесу ткацтва полягає у взаємному переплетенні основних і уткових ниток у заданій послідовності. Причому основні й уткові нитки розташовують, як правило, взаємно перпендикулярно. Процес ткацтва є циклічним і включає п'ять операцій, що повторюються при формуванні кожного елемента тканини. Одна уткова нитка і система основних ниток, що згинаються і розтягуються при взаємних охопленнях і контактах, утворюють цей своєрідний міцний елемент структури ткацького переплетення.

Процес формування складається з наступних операцій [10]: зевування, прокладання уткової нитки в зев, прибіг уткової нитки до опушки тканини, відвід елемента тканини з зони формування і компенсація витраченої основи на утворення елемента тканини. Останні дві операції здійснюються при подовжньому русі тканини й основи, слідом за прибоєм утоку або разом з цією операцією.

Стабільність процесу формування тканини і задана структура її забезпечується визначеним заправним (початковим) натягом основи, оптимальною заправною лінією ткацького верстата і взаємним розташуванням робочих органів при формуванні тканини, моментом вступу їх у цикл роботи ткацького верстата, тобто залежать параметрів заправлення верстата, параметрів процесу і структури тканини. Усі технологічні операції здійснюються робочими органами (механічної, пневматичної або гідравлічної дії), кінематичні і динамічні характеристики руху яких мають велике значення для забезпечення стабільності формування тканини.

Робочі органи ткацького верстата приводяться в дію (прямування) спеціальними механізмами. У залежності від призначення всі механізми ткацького верстата можна розділити на три групи: 1) основні механізми, що забезпечують виконання основних технологічних операцій у процесі формування тканини; до них відносяться: зевування, бойовий, батаний механізми і механізми натягу і відпустки основи і

навівання тканини; 2) додаткові механізми, що забезпечують підвищення продуктивності верстата; до них відносяться механізми живлення верстата утком; 3) запобіжні механізми, що попереджають виникнення браку тканини і поломки деталей верстата.

Найбільш загальний процес переплетення ниток у тканині реалізується на ткацькому верстаті, що складається з п'яти основних частин [12]:

1. Котушка, на яку намотується основа тканини.
2. Ремізи, через які проходить основа тканини. Кожна рамка ремізу може бути піднята (або опущена), щоб пропустити нитку, що наповнює, над (або під) основою.
3. Човник, який веде нитку, що наповняє, (уток).
4. Бьдро, функція якого полягає в проштовхуванні або закріпленні нитки, що наповняє, у вже витканій матерії.
5. Котушка, на яку приймається готова тканина.

Щоб формально виразити образи рухів при переплетенні ниток у тканині, будемо вважати утворюючими основні рухи, розбиті на два класи [12]:

$$G = G^{(1)} \cup G^{(2)}. \tag{11}$$

Тут

$$G^{(1)} = \{h_1, h_2, \dots, h_r\}, \quad G^{(2)} = \{f_1, f_2, \dots, f_s\} \tag{12}$$

де  $h_i$  – рух, що представляє підняття рами  $i$ -го ремізу,  
 $f_j$  – просування човника з  $j$ -й ниткою, що наповняє.

Нехай  $W = \{1, 2, \dots, v\}$  позначає сукупність перегинів ниток основи. Розглянемо розбивку:

$$W = h_1 \cup h_2 \cup \dots \cup h_r \tag{13}$$

на непересічні підмножини. Конфігурації, що складаються з « $h$ » і « $f$ », формують образи тканини.

**Образи руху реміз, що породжують плоске зображення.**

Образи руху породжують плоскі образи тканини. Для того щоб їх ідентифікувати, будемо застосовувати правило ідентифікації, що засноване лише на значенні сорту нитки, видимій на кожному з перетинань основи з наповнювачем. При цьому ми нехтуємо деякими властивостями результуючої тканини, але зберігаємо всю існуючу комбінаторну інформацію.

Якщо є лише 2 ремізи,  $r=2$ , і один наповнювач  $s=1$ , то можна одержати простий образ тканини шляхом періодичного повторення конфігурації руху, приведеної на малюнку 1а ( $h_1 = \{1, 3, 5, \dots\}$   $h_2 = \{2, 4, 6, \dots\}$ ). Нитки основи проходять через ремізи 1 і 2 перемежованому порядку. При цьому образи руху формують плоский образ, показаний на рисунку 1б.

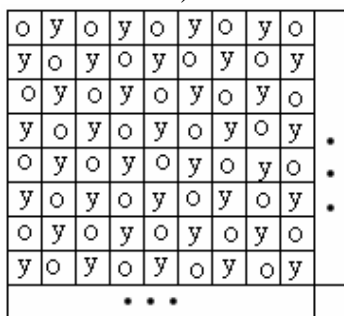
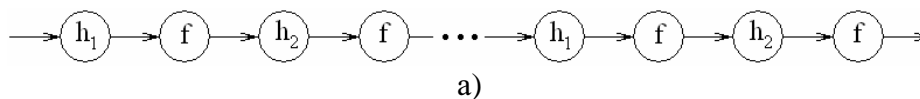


Рис. 1 Проста тканина:

а) образи рухів, що породжують плоский образ тканини; б) плоский образ тканини.

Математичний опис даного простого переплетення повністю відповідає математичній моделі викладеній вище.

Зрозуміло, дана модель не вичерпує всі можливі види переплетення ниток при формуванні тканин.

Твілові тканини вимагають, принаймні, 3 ремізи. На рисунку 2а,в показаний трьох вальний твіл, і отриманий плоский образ має діагоналі, типові для твіла [12].

Можна одержати більш складні форми, варіюючи діагональ за допомогою зміни в основі. Одна з таких варіацій показана на рисунку 2 б,г. У ній використовуються 4 ремізи, у яких порядок ниток основи встановлюється різницями ...5,3,5,3,5,3,... так, що, відправляючись від нитки 1, ми одержуємо 1,6,9,14,17,... .

Просторово-тимчасова конфігурація має цикл, як це показано на малюнку 2г, причому ремізи чергуються додатком 1 по модулю 4. На малюнку цим рухам відповідають образи у вигляді «ялинки».

Для сатину необхідні принаймні 5 ремізів [12], оскільки при меншому їхньому числі одержують лише твілові образи. Приклад атласу з п'ятьма валами приведений на рисунку 4, де порядок ниток основи задається різницями ... 5,5,5, ... так, що, відправляючись від нитки 1, ми одержуємо для першої ремізи 1,6,11,16, ... і т.д. Часова послідовність для ремізів задається додатком 3 по модулю 5. Результат буде залежати від того, що буде переважати – основа або утік.

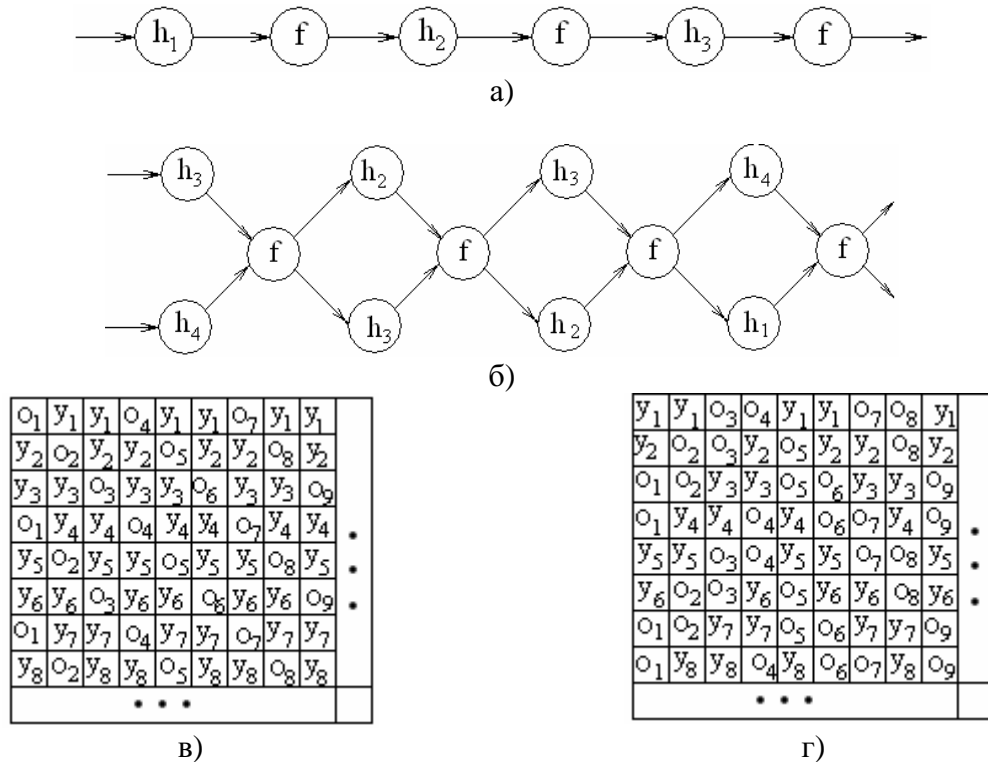


Рис. 2 Твілова тканина:

- а) образи рухів, що породжують плоский образ тканини з використанням 3 реміз;
- б) образи рухів, що породжують плоский образ тканини з використанням 4 реміз;
- в) плоский образ тканини з використанням 3 реміз.
- г) плоский образ тканини з використанням 4 реміз.

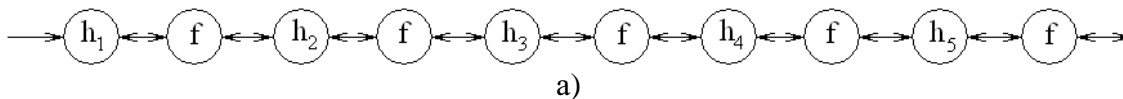
Отриманий плоский образ є п'ятивальним сатином. Відзначимо, що дана структура типова для атласу, вона має тенденцію відбивати світло і додає блиску поверхні тканини.

**Морфогенетичне рівняння тканини.**

Розглянемо загальний випадок руху при формуванні переплетень ниток як зображення на просторово-часовому тлі, тоді в момент часу t маємо

$$d(t) = \begin{cases} f = f(t), \\ h = h(t), \end{cases} \quad (14)$$

коли ремізу  $h(t)$  піднята, після чого рухається човник з утком  $f(t)$ . Значеннями  $f$  є натуральні числа, але значення  $h$  становлять підмножини  $W$ . Нехай  $x$  – координатна вісь, що перетинає основу, а  $y$  – інша координатна вісь, перпендикулярна їй. Цілі значення  $x$  і  $y$  (тут використовуються тільки цілі значення) відповідають перетинанням основи й утку. Якщо ототожнити  $y$  з  $t$ , то просторово-часове зображення, що задається формулою (14), робить просторове (або, скоріше, плоске) зображення  $I$ .



$o_1$	$y_1$	$y_1$	$y_1$	$y_1$	$o_6$	$y_1$	$y_1$	$y_1$	
$y_2$	$y_2$	$y_2$	$o_4$	$y_2$	$y_2$	$y_2$	$y_2$	$o_9$	
$y_3$	$o_2$	$y_3$	$y_3$	$y_3$	$y_3$	$o_7$	$y_3$	$y_3$	
$y_4$	$y_4$	$y_4$	$y_4$	$o_5$	$y_4$	$y_4$	$y_4$	$y_4$	•
$y_5$	$y_5$	$o_3$	$y_5$	$y_5$	$y_5$	$y_5$	$o_8$	$y_5$	•
$o_1$	$y_6$	$y_6$	$y_6$	$y_6$	$o_6$	$y_6$	$y_6$	$y_6$	•
$y_7$	$y_7$	$y_7$	$o_4$	$y_7$	$y_7$	$y_7$	$y_7$	$o_9$	
$y_8$	$o_2$	$y_8$	$y_8$	$y_8$	$y_8$	$o_7$	$y_8$	$y_8$	
									•••

б)

Рис. 3 Атлас, отриманий з використанням 5 реміз:

а) образи рухів, що породжують плоский образ тканини; б) плоский образ тканини.

Якщо показується  $x$ -нитка основи із значенням  $w(x)$ , то це означає, що вона піднята ремізою, через яку вона просмикується. У протилежному випадку уток  $f=f(y)$ . Отже,

$$I(x, y) = \begin{cases} w(x), & \text{якщо } x \in h(y) \\ f(y), & \text{якщо } x \notin h(y) \end{cases} \quad (15)$$

або

$$Im(x, y) = f(y_j) + In[w(x_i) - f(y_j)], \quad \{x \in h_n(y_j)\} \quad (16)$$

де символ  $In$  означає індикаторну функцію виразу, що знаходиться у фігурних дужках.

Співвідношення (16) перетворить зображення руху  $\{f(t), h(t)\}$  в плоске зображення  $Im$  і є морфогенетичним рівнянням. У випадку тканини морфогенетичне рівняння, що керує синтезом образів виявляється досить простим, на відміну від аналогічних рівнянь для інших комбінацій засобів і матеріалу.

**Математична модель тканини, що враховує технологію переплетення ниток.**

Для урахування топології форми переплетення ниток у рівняння моделі тканини потрібно ввести оператор топології  $D_{im}$ , який буде враховувати яка саме нитка основи чи утку в результаті їх перекичування або перетинання буде знаходитись в полі поверхневого візуального спостереження. Таким чином, модель тканини, що враховує технологію ткацтва, буде описуватися рівнянням:

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \bar{\varphi}_{nx} D_{im} S \bar{\varphi}_{my} , \quad (17)$$

де  $D_{im}$  - оператор, що відображає технологію переплетення ниток.

Для узгодження розмірності координат морфогенетичного рівняння (16) з оператором топології  $D_{im}$  в рівнянні моделі тканини (17) запровадимо масштабні коефіцієнти:

$$D_{\text{im}}(x_1, y_1) = f(m_1 y) + \ln[w(n_1 x) - f(m_1 y)], \quad \{x \in h(m_1 y)\},$$

$$n_1 = \kappa_x \cdot n, \quad m_1 = \kappa_y \cdot m$$
(18)

де  $n, m$  – задається розкладанням у ряд Фур'є;

$\kappa_x$  – масштабний коефіцієнт, що узгоджує координати морфогенетичного рівняння з координатами ряду Фур'є по осі  $x$  (уздовж утоку);

$\kappa_y$  – масштабний коефіцієнт, що узгоджує координати морфогенетичного рівняння з координатами ряду Фур'є по осі  $y$  (уздовж основи).

Індикаторний вираз, що враховує технологію переплетення ниток відбиває алгоритм формування текстури переплетення й у загальному вигляді буде виглядати в такий спосіб:

$$h(m_1 y) = \{ h^{\text{top}} : \text{top} \in W_i \},$$
(19)

де  $W_i$  – послідовність руху реміз, що створює задане переплетення ниток для визначеного вигляду тканини.

Для розглянутих тканин значення  $W_i$  представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Послідовність руху реміз, що створює топологію переплетення ниток

Вид тканини	Кількість реміз	Послідовність руху реміз $W_i$
Твіл	3	$h_1 = \{1,4,7,\dots\}, h_2 = \{2,5,8,\dots\}, h_3 = \{3,6,9,\dots\}$
Твіл	4	$h_1 = \{1,6,9,14,17,\dots\}, h_2 = \{2,5,10,13,18,\dots\},$ $h_3 = \{3,8,11,16,19,\dots\}, h_4 = \{4,7,12,15,20,\dots\}$
Сатин	5	$h_1 = \{1,6,11,\dots\}, h_2 = \{2,7,12,\dots\}, h_3 = \{3,8,13,\dots\}$ $h_4 = \{4,9,14,\dots\}, h_5 = \{5,10,15,\dots\}$

Утворюючим, представленим у моделях руху на малюнках, відповідає певна арність. Розмір арності являє собою суму вхідної арності  $w_{\text{in}}(g)$  і вихідної арності  $w_{\text{out}}(g)$ :

$$w(g) = w_{\text{in}}(g) + w_{\text{out}}(g).$$
(20)

У прикладах переплетення ниток арність не обмежується простою конфігурацією рівної двом. Також варто враховувати, що не всі регулярні конфігурації мають однакову вагу. Для введення міри на просторі конфігурацій необхідно визначити розподіл імовірностей. У випадку метричної теорії образів комбінаторні властивості приводять до певних імовірнісних наслідків. Розглянемо простір  $\mathfrak{R}_n$  і довільне джерело утворюючих, так що на множині утворюючих  $G$  заданий апріорний розподіл  $q$ . Нехай  $q^n$  – добуток мір на прямому добутку просторів  $G^n = G \times G \times \dots \times G$ , причому  $q$  – безумовний розподіл по кожній координаті.

Якщо  $q^n \{ \mathfrak{R}_n(\Omega) \} > 0$ , то розподіл імовірностей  $q_\Omega^n$  визначається на сукупності регулярних конфігурацій як умовна міра.

$$q_\Omega^n \{ W \} = q^n \{ W | \mathfrak{R}_n(\Omega) \} = \frac{q^n \{ W \cap \mathfrak{R}_n(\Omega) \}}{q^n \{ \mathfrak{R}_n(\Omega) \}}.$$
(21)

Тут для  $n$  утворюючих  $g_i$ , що входять у припустимі  $n$ -елементарні конфігурації, вводиться фіксована індексація, що вибирається в залежності від використовуваного типу

з'єднання. Користуючись такою індексацією, можна розглядати  $(g_1, g_2, \dots, g_n)$  як точку в просторі  $G^n$  і  $W$  – в якості підмножини  $G^n$ .

Підставимо отриманий вираз (18) у рівняння математичної моделі тканини (17). Одержимо:

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \bar{\varphi}_{nx} (f(m_1 y) + \ln[w(n_1 x) - f(m_1 y)]) S \bar{\varphi}_{my} . \quad (22)$$

Отримана модель враховує не тільки топологічні особливості тканини, але і технологію формування конкретного виду переплетення.

Якщо ми відкинемо фігурні дужки в рівнянні (18) і змінимо ліву частину, замінюючи  $x$  на  $-x$ , то одержимо плоске зображення на зворотній стороні тканини. Таким чином, підставивши отримане зображення виворітної сторони тканини в рівняння (17) можна одержати модель тканини, зручну при додатковому контролі готової тканини з вивороту.

**Висновки:**

1. Отримано узагальнену математичну модель тканин складного переплетення, що враховує технологію переплетення ниток (22).
2. З аналізу отриманих формул (18) і (22) можна зробити висновок, що отримана модель тканини відображає структуру готової тканини і дозволяє використовувати її при візуальному автоматичному контролі готових тканин, як з лицьової поверхні, так і з виворітної, що підвищить якість розбраковування.
3. Отримана математична модель тканини як об'єкту контролю забезпечує умови для більш швидкого інженерного конструювання раціональної системи автоматичного регулювання технологічного процесу, створення системи автоматичного технічного контролю процесів і управління агрегатами і потоковими лініями.
4. Отриману математичну модель структури тканини можна використовувати в системах технічного зору з використанням компенсації інформаційних потоків для підвищення відсотка правильного розпізнавання.
5. Аналіз сигналу неузгодженості в системах з компенсацією, що використовують отриману модель дозволяє судити про поточний стан устаткування ткацтва, що дозволить скоротити відсоток браку за рахунок виключення поступових відмовлень устаткування і своєчасного налагодження робочих органів ткацького верстата.
6. Отримана математична модель тканини (22) чутлива до різниці між переплетенням нитки основи з ниткою утку і їхнім перетинанням, що особливо важливо при контролі візуальних показників системами з телевізійними датчиками.

In given article are considered questions of building mathematical models fabrics with provision for technologies of production fabric. Analysed motion models, which generate a topology of binding the threads in weaving. Received mathematical model fabrics, which takes a topology of binding the threads into account.

1. Севостьянов А.Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. - М.: Легкая индустрия, 1980. – 392 с.
2. Anagnostopoulos C. et al., “High Performance Computing Application for the Textile Quality Control”, to be appeared in the International Conference on Intelligent Information Processing (IIP 2000) proceedings, Federated Conference of the World Computer Congress (WCC 2000), 21-25 August 2000, Beijing, China.
3. Храпливый А.П. Теоретические основы и практика разработки систем и средств контроля и управления структурными показателями тканей. Диссертация на соискание ученой степени д-ра. тех. наук: 05.13.07 - Ленинградский ордена Трудового

Красного Знамени институт текстильной и легкой промышленности им. С.М. Кирова, 1990 г.

4. Храпливий А.П. Телевизионный датчик для контроля качества тканей // Микропроцессоры и устройства автоматики в системах управления электроприводами. - Иваново. - 1983. – 84 с.

5. Будак Б.М., Фомин С.В. Кратные интегралы и ряды. - М., 1967. - 606 с.

6. Рожков С.А., Куцак Р.С., Бражник Д.А. Описание объекта как двумерной структуры с продолжением по рапортам Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины, №1 (8), 2004 г., с.274-281.

7. Храпливий А.П., Бражник О.М., Тернова Т.І. Засоби побудови систем автоматичної розбавки тканин //Технологія, автоматизація та економіка в переробній галузі. Міністерство освіти України, Інститут змісту і методів навчання, Херсонський державний технічний університет. Київ, 1998. с.86-90.

8. Тернова Т.І. Методи контролю поверхні текстильних матеріалів // Тезиси докладов міжнародної научно-практичної конференції «Проблеми легкой и текстильной промышленности Украины». - Херсон, 2005. Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины, №1 (10), 2005 г., с.276.

9. Прядение хлопка и химических волокон (проектирование смесей, приготовление холстов, чес. и греб. ленты): Учебник для вузов / И.Г.Борзунов, К.И.Бадалов, В.Г.Гончаров:- 2-е изд., перераб. и доп. - М: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – С. 376.

10. Механическая технология текстильных материалов: учеб. для вузов / А.Г.Севостьянов, Н.А.Осьмин, В.П.Щербаков и др.-М.: Легпромбытиздат 1995.-512с.:ил.)

11. Справочник по хлопкопрядению /Широков В.П., Владимиров Б.М., Полякова Д.А. и др.-5-е изд. перераб. и доп.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1985,-427с.

12. У. Гренандер Лекции по теории образов. Перевод с англ. Под ред. Ю. Журавлева, Издательство «МИР», - :М. 1979



ІНФОРМАЦІЙНИЙ МОДУЛЬ ЕКСПРЕС-ПОШУКУ ТОЧОК  
ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ

Тулученко Г.Я.

**Постановка проблеми.** Метод нейтралізації входить до складу титрометричних (об'ємних) методів кількісного аналізу, що застосовуються в аналітичній хімії для встановлення кількісних співвідношень між складовими частинами речовин [1]. Цей метод аналізу широко використовується в харчовій, текстильній, хімічній, фармацевтичній промисловості та в інших споріднених галузях.

Відомі в теорії дисоціації електролітів моделі реального, а не спрощеного, процесу нейтралізації мають настільки складну структуру, що деякі їх параметри не можуть бути встановлені експериментальним шляхом. Відповідно точність відновлення коефіцієнтів такої, суттєво нелінійної, моделі за експериментальними даними низька. Все це спонукало розвинення більш складних інструментальних методів встановлення точок еквівалентності [1].

В сучасних економічних умовах для більшості лабораторій є вирішальними доступність обладнання і простота обробки експериментальних даних при виборі методу встановлення точок еквівалентності.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Враховуючи складність профілю кривих титрування для математичного опису, перспективним є залучення до їх моделювання сплайнних функцій з властивостями збереження проміжків монотонності. Автором проведено аналіз якості інтерполяції названих залежностей засобами пакету SPLINE TOOLBOX системи комп'ютерної математики MATLAB, до складу якого входять, між іншими, сплайни, що за літературними джерелами визнані менш схильними до утворення осциляцій. Але виявилось, що всі досліджені сплайни не зберігають монотонного характеру експериментальних залежностей [2]. Тому за доцільне було визнано використання для відновлення кривих титрування модифікованих сплайнів, що побудовані на основі поліномів С.Н.Бернштейна, які зберігають проміжки монотонності експериментальної залежності [3, 4].

**Постановка задачі і цілі статті.** На основі математичного забезпечення, розробленого в [3, 4], створити інформаційний модуль експрес-пошуку точок еквівалентності з точністю, задовільною для технологічних потреб.

**Основна частина.** Практично метод нейтралізації реалізують наступним чином. Наприклад, при титруванні кислоти по мірі доливання лугу степінь кислотності розчину змінюється і реакція середовища переходить з кислої у нейтральну, а потім лужну. Отже,  $pH$  розчину, що титрується залежить від об'єму долитого розчину  $V$  і його концентрації.

Момент закінчення реакції нейтралізації, коли речовини, що взаємодіють, повністю прореагували між собою, називають точкою еквівалентності, тому що в цей момент кількості речовин, що прореагували, строго еквівалентні.

Криві, які є графіком залежності  $pH$  розчину, що титрується, в залежності від об'єму долитого розчину, називають кривими титрування. Криві титрування мають характерний сходиноподібний профіль. Вони є графіками монотонних функцій. Точкам еквівалентності на них відповідають точки перегину графіків. Кількість точок еквівалентності дорівнює числу основності кислот (кислотності лугів) або сумі чисел основності суміші кислот (кислотності суміші лугів).

Тому з математичної точки зору необхідно розв'язати наступну задачу обробки експериментальних даних.

**Математична постановка задачі.** За експериментальною залежністю даних  $(V_i; pH_i)$ ,  $i = \overline{0, N}$  відновити монотонну функцію і встановити координати її точок перегину.

Для відновлення експериментальних залежностей будемо використовувати сплайни, що визначаються за наступними формулами [3, 4]:

$$P_i(x) = \frac{1}{h^3} \cdot (y_i \cdot (x_{i+1} - x)^3 + 3q_{i1} \cdot (x - x_i) \cdot (x_{i+1} - x)^2 +$$

$$+ 3q_{i2} \cdot (x - x_i)^2 \cdot (x_{i+1} - x) + y_{i+1} \cdot (x - x_i)^3),$$

$$\left. \begin{aligned} q_{i1} &= y_i - \frac{3}{h} \cdot y'_i \\ q_{i2} &= y_{i+1} - \frac{3}{h} \cdot y'_{i+1} \end{aligned} \right\}$$

$$p_i y'_{i-1} + (6 - 2p_i) y'_i + p_i y'_{i+1} = 3mx(2\gamma\delta_i^-, \delta_i^- + \delta_i^+, 2\gamma\delta_i^+),$$

де  $p_i = \min[1, 2\gamma \min(|\delta_i^+|, |\delta_i^-|) / (|\delta_i^+| + |\delta_i^-|)]$ ,

$$\delta_i^+ = (y_{i+1} - y_i)/h, \quad \delta_i^- = (y_i - y_{i-1})/h, \quad \gamma \in (1; \sqrt{2}],$$

$$h = x_{i+1} - x_i, \quad i = \overline{0, N-1},$$

$$\left. \begin{aligned} 2y'_0 + y'_1 &= \frac{3}{h}(y_1 - y_0) \\ 2y'_n + y'_{n-1} &= \frac{3}{h}(y_n - y_{n-1}) \end{aligned} \right\}$$

Експериментальні залежності використаємо ті ж, що і в роботі [2]. Вони згенеровані за розрахунковими формулами, які наведені в [1, 5] та узгоджені з поданими там же графіками. При генерації експериментальних послідовностей крок титрування складав 10 мл для одноосновних кислот і 2 мл для багатоосновної кислоти.

В табл.1 наведені показники якості апроксимації експериментальних залежностей за допомогою модифікованого сплайну.

Таблиця 1

Показники якості апроксимації експериментальних залежностей за допомогою модифікованих сплайнів на основі поліномів С.Н.Бернштейна (1)

Кислота	Кількість точок перегину*		Абсциси точок еквівалентності		Відносна похибка, %
	за хімічним змістом задачі	відновленої залежності	дійсні	відновлені	
Сильна	1	7	100,00	99,94	0,06
Слабка	2	7	100,00	99,00	1,00
Багатоосновна	6	12	10,00; 20,00; 30,00	10,42; 20,15; —	4,20; 0,75; —

\* Кількість точок перегину за хімічним змістом задачі складається з точок еквівалентності та точок буферної дії розчинів.

Порівнюючи показники якості апроксимації, які наведені в [2] та в табл. 1, бачимо, що усунення паразитарних екстремумів у відновленій функції не привело до загального погіршення якості апроксимації, а в більшості випадків вона покращилася.

Зазначимо також, що не можна очікувати 100-відсоткової точності встановлення точок еквівалентності не тільки через звичайний внесок похибок округлення при чисельних розрахунках, але й через те, що в експериментальних послідовностях координати точок еквівалентності встановлені теоретично, а координати інших точок обчислені за спрощеними формулами.

Більш детальний аналіз розташування паразитарних точок перегину графіка відновленої функції показує їх локалізацію на ділянках графіка, наближених до горизонтальних. Тобто відновлена функція не зберігає на цих ділянках проміжки опуклості експериментальної залежності. Одночасно малі значення модулів градієнтів експериментальних залежностей на цих же ділянках запобігають значному відхиленню графіків експериментальних та відновлених функцій. При візуалізації цей дефект ще додатково нівелюється за рахунок дозвільних можливостей комп'ютерних дисплеїв (рис. 1).

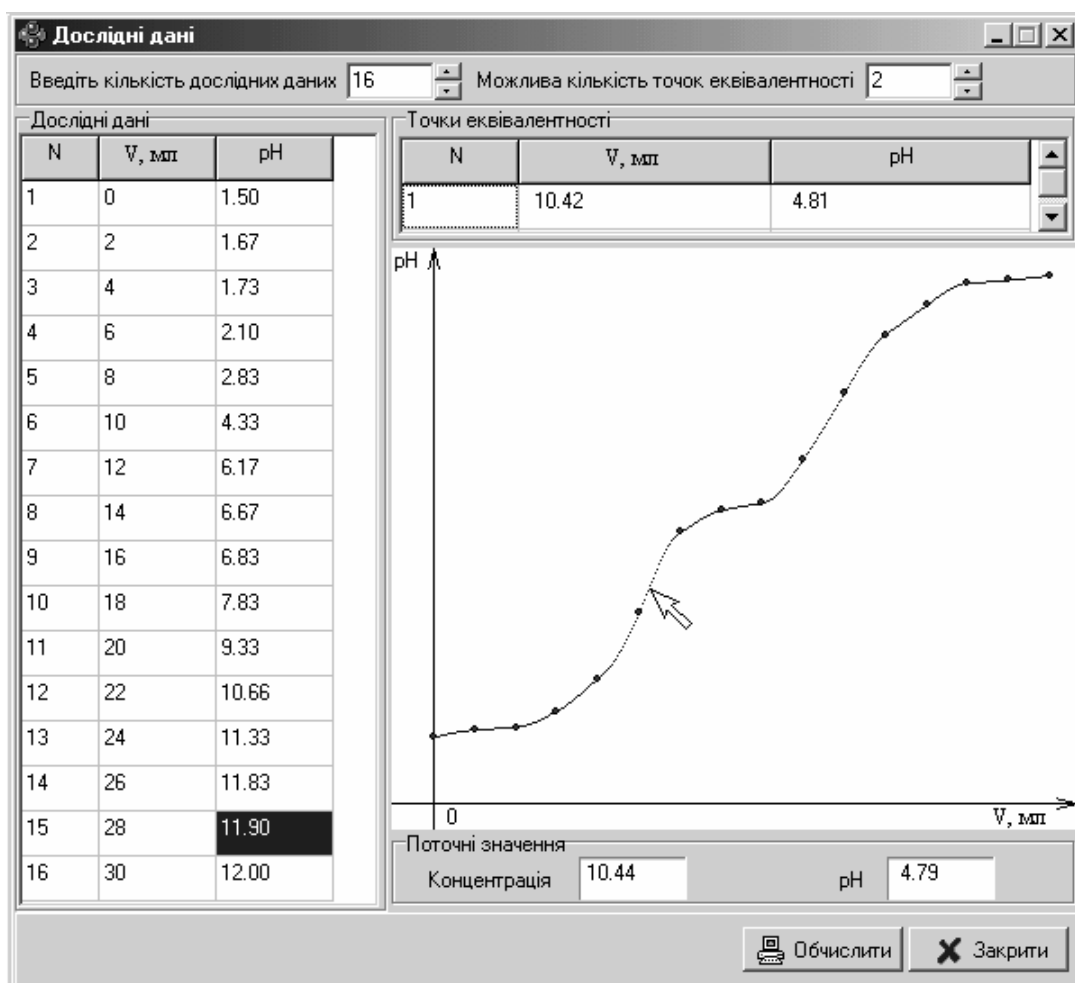


Рис. 1. Елемент інтерфейсу роботи ППП "Дисоціація"

Характерне сполучення великих градієнтів функцій в дійсних точках еквівалентності та малих градієнтів функції в паразитарних точках перегину дозволяє проводити сортування масиву точок перегину відновленої функції з метою виділення точок перегину, що відповідають хімічному змісту задачі.

Автором в системі програмування Delphi розроблено ППП "Дисоціація" для розв'язання поставленої задачі. Він працює за наступним алгоритмом.

1. Формування експериментальної залежності.
2. Встановлення характеру монотонності експериментальної залежності.

3. Розрахунок коефіцієнтів ланок модифікованих сплайнів на основі поліномів С.Н.Бернштейна (1).
4. Формування масиву точок перегину відновленої функції.
5. Видалення з сформованого масиву тих точок перегину, в яких зміна опуклості не відповідає характеру монотонності функції. (Пояснення наведені нижче).
6. Сортування масиву точок перегину у відповідності до значень модуля градієнта відновленої функції.
7. Візуалізація експериментальної та відновленої залежності.
8. Виведення на екран списку координат можливих точок перегину. Кількість точок у списку дорівнює мінімальному з двох чисел: розміру масиву точок перегину після сортування та можливої кількості точок еквівалентності, що вводиться інтерактивно користувачем.

Дамо деякі пояснення до роботи алгоритму. За теорією дисоціації електролітів залежність титрування кислоти є зростаючою функцією, залежність титрування лугу – спадною [1]. У відповідності до цього на другому кроці алгоритму відбувається перевірка монотонності експериментальної залежності.

При титруванні кислот графік залежності змінює свою форму з увігнутої на опуклу в точках еквівалентності. При титруванні лугів форма опуклості кривої титрування змінюється в оберненому порядку. Тому при сортуванні масиву точок перегину залишаємо в ньому при зростаючій залежності точки перегину, в яких друга похідна відновленої функції змінює свій знак з "+" на "-", а при спадній залежності залишаємо точки перегину з оберненою зміною знаку другої похідної.

Зазначимо також, що серед видалених точок перегину, крім паразитарних, можуть знаходитися точки – центри буферної дії розчинів, які визначаються при титруванні слабких кислот (лугів) та багатоосновних кислот (багатокислотних лугів). Але їх встановлення не стосується поставленої задачі.

Після візуалізації результатів обробки експериментальної залежності користувач може збільшувати кількість точок еквівалентності в списку уразі відповідності кривої титрування дисоціації сходинками речовини, що титрується. За умовчанням на екран виводяться координати однієї точки перегину з найбільшим модулем градієнта функції.

Відзначимо, що при роботі ППП передбачено автоматичне встановлення таких типових помилок експерименту, як порушення монотонності експериментальної залежності або порушення монотонного зростання абсцис точок еквівалентності після сортування їх масиву на шостому кроці алгоритму (за загальною теорією електролітів значення модуля градієнту функції  $pH$  розчину повинні спадати при зростанні точок еквівалентності). В усіх цих випадках на екран виводиться повідомлення про невідповідність експериментальної залежності загальній теорії електролітів.

Розроблений ППП використаний до розв'язання не тільки тестових задач, але знайшов застосування до розв'язання задач опоряджувального виробництва текстильної промисловості [6].

**Висновки.** Запропонований нами експрес-метод встановлення точок еквівалентності вирізняють точність, достатня для технологічних цілей, доступність лабораторного устаткування та швидкість обробки експериментальних даних. Лабораторне устаткування при використанні розробленого ППП є мінімальним і складається з автоматичного дозатору та  $pH$ -метру. До цього складу додається іонівимірювач у разі побудови залежності  $pH$  розчину, що титрується, від концентрації речовини, якою проводиться нейтралізація.

Запропонований спосіб пошуку точок еквівалентності придатний також для дослідження процесів нейтралізації в неводних розчинах. Створення безводних технологій є перспективним напрямком розвитку опоряджувального виробництва в текстильній промисловості.

Додатково зауважимо, що виробники програмного забезпечення не переймаються задачами, що виникають у текстильній галузі і можуть бути ефективно вирішені при залученні інформаційних технологій. Текстильна галузь, зокрема, опоряджувальне виробництво значно відстають за обсягами впровадження інформаційних технологій у порівнянні з іншими промисловими галузями. Тому розробка програмного забезпечення для вирішення виробничих і наукових задач текстильної галузі ще довгий час буде актуальною.

In article the description of mathematical and algorithmic maintenance of the information module of express-search of points of equivalence of process of neutralization is resulted. Examples of its practical use are shown.

1. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Теоретические основы. Количественный анализ. – Т. 2. – М.: Химия, 1970. – С. 93-153.
2. Тулученко Г.Я., Шипілов Ю.Г. Про можливості моделювання процесу нейтралізації стандартними засобами ППП SPLINE TOOLBOX системи MATLAB // ААЭКС. – 2004. - № 2(14). – С. 74-78.
3. Тулученко Г.Я. Про побудову сплайнів на основі поліномів С.Н.Бернштейна.// Вестник ХГТУ. – № 1(19). – 2004. – С.334-338.
4. Хомченко А.Н., Тулученко Г.Я. Модифікація сплайнів на основі поліномів С.Н.Бернштейна // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Вип.. 4, т. 24. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – С.57–60.
5. Крешков А.П., Ярославцев А.А. Курс аналитической химии. Количественный анализ. / Под ред. А.П.Крешкова. – М.: Химия, 1982. – 312 с.
6. Тулученко Г.Я., Шипілов Ю.Г. Застосування сплайнових функцій до дослідження процесу нейтралізації // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – №4. – Ч.2. – С.197–199.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ОСАДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ СУСПЕНЗІЇ

Шпильовий Л.В.

Підвищення ефективності функціонування радіального згущувача на збагачувальних фабриках за рахунок вдосконалення системи автоматичного управління є досить актуальним. Особливої актуальності це питання набирає сьогодні, з огляду на необхідність інтенсифікації всіх збагачувальних процесів, в тому числі згущення, через постійне зниження якості руди, що залучається до переробки, та необхідність забезпечення зростання обсягів виробництва. Необхідність вдосконалення існуючих САУ процесом згущення зумовлена також вимогами економії реагентів (флокулянтів), а також підвищеною увагою до стану забруднення навколишнього середовища зливами згущувачів.

Спроби інтенсифікувати процес згущення за рахунок більш ефективного автоматичного дозування флокулянту в радіальний згущувач відомі давно [1–3]. Так, в [1] пропонувалося флокулянт подавати в залежності від масових витрат дисперсної фази в суспензії живлення згущувача, що мало б забезпечити наперед визначені оптимальні питомі витрати флокулянту, за яких швидкість осадження частинок дисперсної фази була б максимальною. В роботах [2,3] автоматичне дозування флокулянта пропонується здійснювати за допомогою систем регулювання замкненого типу. При цьому в якості вихідного параметру процесу пропонуються посередні показники – мутність зливу [2], чи висота зони проясненої рідини у згущувачі [3]. Останні САУ мають ту перевагу, що реагують на всі можливі збурення процесу згущення. Але через велику інерційність об'єкту, особливо на згущувачах великого діаметра, якість автоматичного регулювання та ефективність застосування флокулянтів і в цих випадках залишається незадовільною [4]. Невідповідність сучасного стану автоматизації дозування флокулянтів в процесах згущення вимогам практики зневоднення концентратів та продуктів збагачення корисних копалин пояснюється недостатньою дослідженістю основних закономірностей процесу осадження дисперсної фази зфлокульованих суспензій та відсутністю математичних моделей, придатних для побудови ефективних алгоритмів управління.

Сучасний рівень вивченості механізму флокуляції хоч і дає якісну характеристику процесу, та не дає кількісних залежностей, які для конкретного типу промислової суспензії характеризували б вплив основних технологічних її параметрів на швидкість осадження дисперсної фази; дозволяли визначити раціональні режими процесу і розрахувати оптимальні витрати флокулянту, за яких забезпечується найвища швидкість осадження. При недостатньому дозуванні флокулянту не відбувається злипання частинок в агрегати через малу товщину покриття поверхні частинок дисперсної фази; при передозуванні флокуляція не відбувається через стабілізацію суспензії. Звичайно оптимальні витрати флокулянту визначають в залежності від витрат дисперсної фази суспензії живлення згущувача. Але відомо, що ступінь флокуляції суттєво залежить від електрокінетичного потенціалу на поверхні частинок дисперсної фази, який визначається концентрацією іонів водню в рідкій фазі суспензії [5]. Тому вибір флокулянту та його витрат має бути узгодженим з мінералогічним та гранулометричним складом дисперсної фази, а також іонним складом рідкої фази суспензії. Цей вибір може бути обґрунтований лабораторними дослідженнями осадження суспензій.

Тож невирішеним залишається вивчення умов та визначення раціональних режимів осадження дисперсної фази за спільного та одночасного впливу основних параметрів процесу на швидкість падіння зфлокульованих частинок, встановлення характеру

залежності, розробка математичної моделі, придатної для цілей управління, та алгоритму оптимального управління процесом згущення.

Метою статті є розробка регресійної моделі процесу осадження польовошпатового концентрату та алгоритму управління автоматичним дозуванням флокулянту в радіальний згущувач.

Завдання вирішували шляхом дослідження впливу найбільш важливих параметрів процесу осадження, які визначалася попередніми нашими дослідженнями різних типів промислових суспензій [6,7] та аналізом відомих аналітичних залежностей [8], на швидкість осадження дисперсної фази.

Осадження є визначальною стадією для всього процесу згущення [9]. Зростання швидкості осадження частинок дисперсної фази призводить до зросту продуктивності згущувача по твердому і зливу без зниження якості зливу. При стабільних параметрах живлення менше частинок дисперсної фази виноситься висхідними потоками рідини в злив згущувача.

З огляду на відому залежність продуктивності згущувача від швидкості осадження метою управління режимом осаджування в радіальному згущувачі має бути автоматична підтримка максимального значення швидкості осадження дисперсної фази:  $w \rightarrow \max$ .

Об'єктом дослідження були штучні суспензії, які готували з сухих порошків лежалих хвостів колишньої збагачувальної фабрики, що переробляла руду Маріупольського цирконового родовища. Мінералогічний склад польовошпатового концентрату, мас. доля, % : мікроклін – 44,0; альбіт – 34,4; нефелін – 20,55; егірін – 0,3; лепідомелан – 0,32; циркон – 0,05; пірохлор – 0,01; гідроокисли заліза – 0,22; інші – 0,15.

Хімічний склад концентрату відповідав технічним вимогам технологічного регламенту на виробництво польовошпатового концентрату, мас. доля, % :  $K_2O$  – 6...7;  $Na_2O$  – 5...6;  $SiO_2$  – 60...65;  $Fe_2O_3$  – 0,15...0,25;  $Al_2O_3$  – 20...22;  $ZrO_2$  – 0,04;  $Nb_2O_5$  – 0,03;  $TiO_2$  – 0,1.

Питома маса концентрату – 2,60...2,62 г/см<sup>3</sup>.

Дослідження проводили методом активного експерименту в лабораторних умовах за відомою методикою [10] в скляному циліндрі ємністю 500 см<sup>3</sup>.

При плануванні експерименту за незалежні фактори приймали:  $Q_{\phi}$  – питомі витрати флокулянту, визначені як об'ємні витрати флокулянту на одиницю загальної поверхні одиниці маси дисперсної фази суспензії,  $\frac{cm^3}{10M^2 / \kappa\Gamma}$ ;  $pH$  – концентрація іонів водню, од.;  $C$  – концентрація дисперсної фази в суспензії, %;  $d$  – вміст класу – 0,063 мм в дисперсній фазі, %;  $t$  – температура суспензії, °С.

Величину  $pH$  суспензії доводили до завданого значення розчином соди ( $Na_2CO_3$ ). Як флокулянт застосовували 0,1 %-ий водний розчин поліакриламід (ПАА), який вводили в скляний циліндр піпеткою.

В якості цільової функції ( $Y$ , мм/с) прийнято швидкість осадження, яка визначалася згідно загальноприйнятих рекомендацій [10]. При проведенні експерименту слідкували за опусканням межі розподілу фаз в циліндрі. Час, за який межа розподілу фаз досягала контрольної позначки на шкалі циліндра, реєстрували за допомогою секундоміра. Швидкість осадження визначали за зміною часу проходження межею розподілу фаз контрольної позначки.

Експеримент поставлено за програмою центрального композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера [11]. Ядро плану представлено напівреплікою  $2^{5-1}$  ( $1=X_1X_2X_3X_4X_5$ ). Реалізовані 16 дослідів на основних рівнях доповнені ще 10 дослідями в зіркових точках (величина зіркового плеча в цьому випадку дорівнює 2) та шістьма дослідями в центрі плану.

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження вибрані за результатами попередніх експериментів і на основі апріорної інформації (табл. 1).

Область зміни незалежних факторів відповідає допустимому технологічним регламентом діапазону зміни технологічних параметрів.

Функція відгуків апроксимована поліномом другого порядку. Обробка результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля „Планування експерименту” статистичної програми Statgraphics 3.0 Plus.

Значущість коефіцієнтів моделі визначалася за допомогою Р-рівня і наведено на стандартизованому Парето-графіку (рис.1). Вертикальна лінія на рис.1 відповідає 95 % статистичній значущості коефіцієнтів.

Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів отримало вигляд:

$$Y = 7,286 + 0,579 X_1 - 0,129 X_2 - 0,588 X_3 - 0,775 X_4 + 0,554 X_5 - 0,571 X_1^2 + 0,681 X_1 X_2 - 0,590 X_2^2 \quad (1)$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому (кодованому) виді.

Таблиця 1

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження

Параметр	Позначення	Код	Одиниця виміру	Інтервал	Основні рівні				
					+2	+1	0	-1	-2
Витрати флокулянту	$Q_f$	X1	$\frac{см^3}{10м^2 / κΓ}$	0,05	0,20	0,15	0,10	0,05	0,00
Концентрація іонів водню	$pH$	X2	од.	0,80	10,0	9,20	8,40	7,60	6,80
Вміст класу - 0,063 мм в дисперсійній фазі	$d$	X3	%	5,00	100,0	95,0	90,0	85,0	80,0
Концентрація дисперсної фази суспензії	$C$	X4	%	5,00	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0
Температура суспензії	$t$	X5	°C	5,00	26,0	21,0	16,0	11,0	6,00

Standardized Pareto Chart for Y

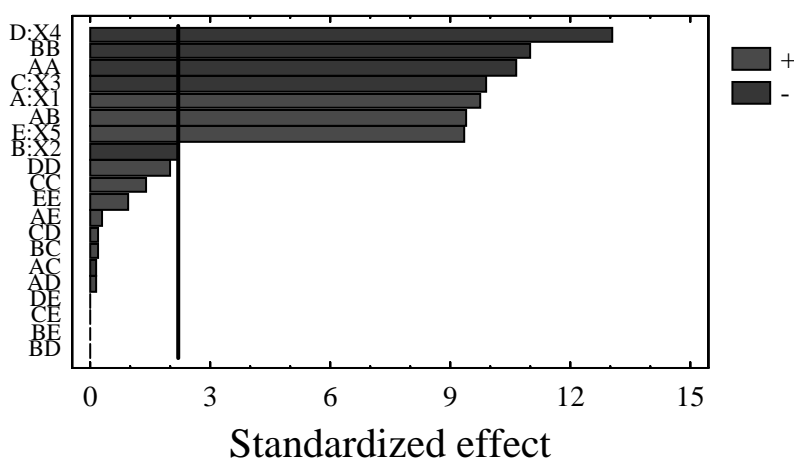


Рис. 1 Значущість коефіцієнтів моделі (Парето-графік)



Як видно з Парето – графіка, статистично значущими є коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії, коефіцієнти при  $X_1^2$  та  $X_2^2$ , та коефіцієнт при парній взаємодії членів  $X_1$  та  $X_2$ .

Значення коефіцієнтів регресії в рівнянні (1) визначають силу впливу відповідних факторів чи їх комбінацій на величину функції відгуку, а знак перед коефіцієнтом – характер цього впливу. Як бачимо, на швидкість осадження дисперсної фази найбільше впливають концентрація дисперсної фази в суспензії, питомі витрати флокулянту та концентрація іонів водню в суспензії. Але треба враховувати, що фактори  $X_1$  та  $X_2$  входять до рівняння у вигляді квадратичних членів, що призводить до заниження їх впливу на функцію відгуку при оцінці за величиною коефіцієнтів регресії. Порівняння розрахункових та експериментальних даних швидкості осадження дисперсної фази показало, що різниця між ними мінімальна (стандартна похибка  $\sigma = 0,28$  мм/с), що свідчить про адекватність моделі. Останнє підтверджується також високим значенням коефіцієнту детермінації R-квадрат, який склав 97,80 %.

Аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою згаданої статистичної програми «Statgraphics 3.0 Plus». На рис. 2 наведено найбільш характерну тривимірну поверхню функції відгуку та її перетини. Зупинимося на них докладніше.

Як видно з рис. 2,а поверхня відгуку  $Y = f(X_1, X_2)$  – це еліптичний параболоїд з екстремумом-максимумом в області  $X_1 = 0,35$ ;  $X_2 = -0,1$  (в кодованому вигляді). Екстремальна залежність швидкості осадження від витрат флокулянту може бути пояснена тим, що при недостатніх витратах ПАА на поверхні частинок твердої фази утворюється плівка флокулянту замалої товщини, а при передозуванні флокулянту настає стабілізація суспензії [13].

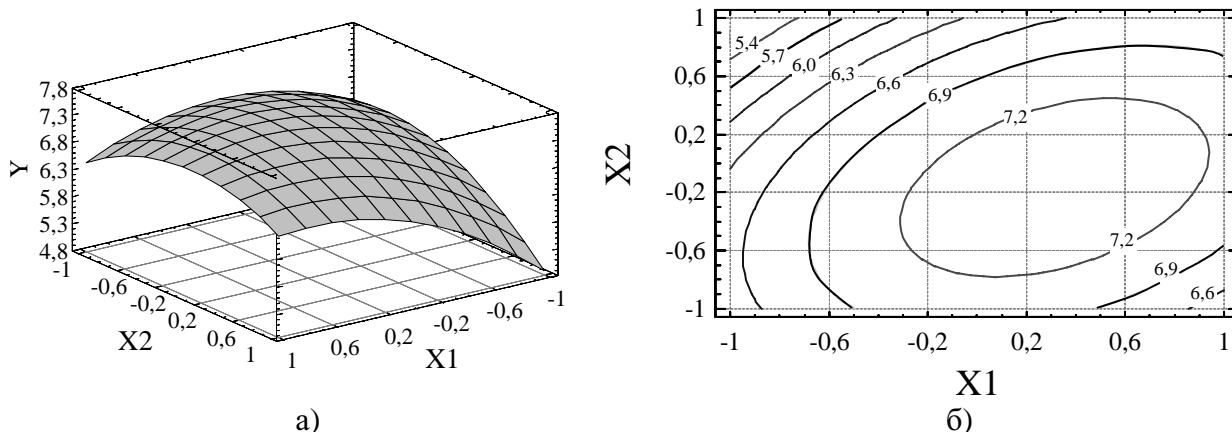


Рис. 2 Поверхня  $Y = f(X_1, X_2)$  – (а), та її контурні криві – (б) при  $X_3 = X_4 = X_5 = 0$

Екстремальний характер залежності швидкості осадження від величини  $pH$  середовища пов'язаний, на нашу думку, із загальноновизнаним механізмом дії електроліту на подвійний електричний шар (ПЕШ) на поверхні частинок.

Перетини поверхні відгуку  $Y = f(X_1, X_2)$  при середніх (нульових) значеннях інших змінних процесу наведено на рис. 2,б.

Аналіз рівняння (1) показує, що зміни таких факторів, як вміст класу – 0,063 мм в дисперсній фазі суспензії, концентрація дисперсної фази в суспензії живлення, та температура суспензії призводять до зміни швидкості осадження, але не до дрейфу координат екстремуму питомих витрат флокулянту.

Перевірка регресійної залежності (1) в промислових умовах, яка полягала в порівнянні результатів спостережень за величиною швидкості осадження дисперсної фази суспензії в промисловому згущувачі з результатами розрахованих значень швидкості за моделлю, показала достатню збіжність (похибка 10,9 %).

На рис. 3 наведені одномірні залежності функції відгуку від питомих витрат флокулянту за різної концентрації іонів водню в дисперсійному середовищі. Як видно з

рисунка, при застосуванні флокулянту швидкість осаджування дисперсної фази збільшується приблизно в 2...5 разів. Але ефективність дії флокулянту суттєво змінюється в залежності від того, в якому за іонним складом дисперсійному середовищі відбувається процес флокуляції. Зміна концентрації іонів водню в суспензії від  $-2$  ( $pH = 6,8$ ) до  $+2$  ( $pH = 10,0$ ) призводить до зміни швидкості осадження. Характер залежності при цьому істотно змінюється: відхилення величини  $pH$  середовища від оптимального призводить до зниження ефективності дії флокулянту, тобто швидкості осадження. Координати екстремуму змінюються при цьому як по осі ординат, так і по осі абсцис.

Причину такого впливу концентрації іонів водню на ефективність дії флокулянту автори роботи [12] вбачають в тому, що спочатку, із збільшенням  $pH$ , спостерігається стиснення дифузної частинки ПЕШ за рахунок переходу протиіонів у внутрішню обкладинку. Це, очевидно, полегшує закріплення і флокулюючу дію реагента. Подальше збільшення  $pH$  супроводжується перезарядкою поверхні частинки. При цьому умови закріплення реагенту погіршуються і ефект флокуляції дещо знижується.

Таким чином, координати оптимуму питомих витрат флокулянту, за яких досягається найвища швидкість осадження дисперсної фази, можуть змінюватися в залежності від іонного складу рідкої фази суспензії - дисперсійного середовища, - що має враховуватися при автоматизації режиму осадження в радіальному згущувачі.

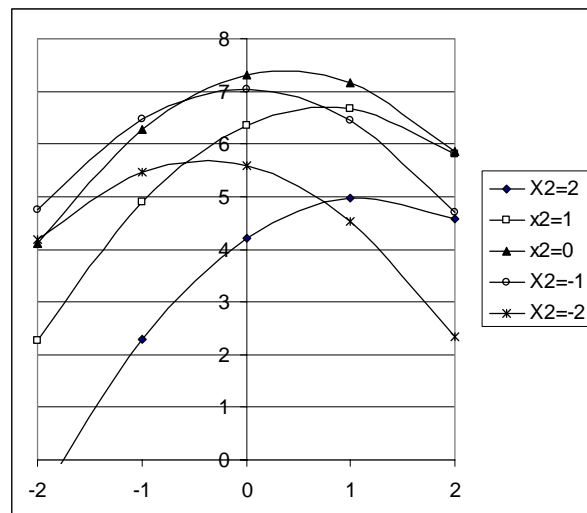


Рис. 3 Залежність швидкості осадження польвошпатового концентрату від питомих витрат флокулянту  $X_1$  та величини  $pH$  суспензії  $X_2$

Знаходження оптимальних щодо показників якості значень керуючих впливів і підтримку оптимального режиму при безперервній зміні зовнішніх збурень, що призводять до зміщення координат точки екстремуму, можна здійснити за допомогою системи екстремального управління. Вирішити екстремальну задачу управління можна, використовуючи принцип управління за збуренням, так як існує можливість безперервного контролю основного збурення (величини  $pH$ ), яке змінює положення точки екстремуму, та встановлено характер впливу цього збурення на зміну режимів роботи системи. В цьому випадку можна створити розімкнений функціональний зв'язок за збуренням, за допомогою якого робота системи в оптимальних режимах буде забезпечуватися з відповідною точністю. Велика інерційність радіального згущувача та труднощі, пов'язані з контролем вихідних показників якості (абсолютної швидкості осадження), а також відносна простота вимірювання величини  $pH$ , дозволяють рекомендувати застосування екстремальної системи розімкненого типу з компаундним зв'язком за збуреннями [13].

Екстремальна задача управління режимом осадження дисперсної фази в радіальному згущувачі зводиться до підтримки максимуму швидкості осадження  $w$  (показник екстремуму) при існуючій концентрації іонів водню в дисперсійному середовищі  $pH$

(збурення) за допомогою зміни питомих витрат флокулянта  $Q_\phi$  (керуючий вплив). При такому способі управління показник екстремуму ( $w$ ) не вимірюється і тому задача екстремального управління вирішується за допомогою жорсткого функціонального зв'язку між збуренням  $pH$  і керуючим впливом  $Q_\phi$ :  $Q_\phi^{opt} = f(pH)$ .

Отримавши інформацію про збурення необхідно на основі апріорних даних про властивості об'єкту знайти оптимальні управління. Залежність оптимальних керуючих впливів від збурень  $Q_\phi^{opt} = f(pH)$  при зміні останніх може визначатися різними способами, але найбільш економічний полягає в виконанні на моделі попередніх розрахунків, згортці результатів в функції чи таблиці, і використання останніх для управління [14].

При зміні величини  $pH$  суспензії необхідно коригувати питомі витрати флокулянту таким чином, щоб швидкість осадження залишалися максимальною. Для побудови алгоритму управління необхідно знати залежність оптимальних питомих витрат флокулянту від величини  $pH$  дисперсного середовища. Для цього з статичних характеристик, наведених на рис. 3, для різних значень концентрації іонів водню в робочому діапазоні її зміни визначали величину питомих витрат флокулянту ( $Q_\phi^{opt}$ ), за яких швидкість осадження дисперсної фази досягає максимального значення. Значення інших факторів (густина суспензії живлення, вміст класу – 0,063 мм в дисперсній фазі, температура) в цих розрахунках приймалися сталими і рівними середнім значенням.

Обробка результатів розрахунків методом найменших квадратів за допомогою пакету Statgraphics 3.0 Plus дозволила побудувати залежність оптимальних питомих витрат флокулянту від концентрації іонів водню (в кодованому вигляді), яку можна виразити лінійним рівнянням виду:

$$Q_\phi^{opt} = 0,42 pH + 0,4 \quad (2)$$

Рівняння (2) є оптимальною характеристикою компаундування, якій притаманна та властивість, що всім точкам, що лежать на ній, відповідає максимальна швидкість осадження при фіксованих значеннях концентрації іонів водню.

При суттєвій зміні коефіцієнтів моделі, наприклад внаслідок зміни мінералогічного складу руди, розрахунок і згортка результатів повторюються. В цьому випадку при управлінні проводяться лише прості розрахунки за залежностями  $Q_\phi^{opt} = f(pH)$ . Завдяки цьому контролер може бути звільнений від постійного пошуку оптимальних значень управляючих впливів за моделлю. Він може бути зайнятий роботою по корекції моделі, перевірці її адекватності, знаходженню рівнянь виду  $Q_\phi^{opt} = f(pH)$  при зміні коефіцієнтів моделі, та рішенням цих рівнянь.

Вимірюючи збурення і визначаючи за формулою (2) керуючі впливи, з врахуванням обмежень  $0 \leq Q_\phi^{opt} \leq Q_\phi^{max}$  можна управляти процесом осадження дисперсної фази оптимально з точки зору вибраного критерію ефективності, та з точністю, що відповідає частці контрольованого збурення в формуванні критерію ефективності.

**Висновки.** Дослідження процесу осадження, як об'єкту автоматичного управління показало, що існує екстремальна залежність швидкості осадження дисперсної фази суспензії польвошпатового концентрату від питомих витрат флокулянту і концентрації іонів водню в дисперсійному середовищі. Застосування екстремального управління є необхідною умовою підвищення ефективності роботи промислових згущувачів на збагачувальних фабриках. Таке управління можна реалізувати екстремальною системою розімкненого типу. Розроблена регресійна математична модель адекватно описує процес осадження польвошпатових хвостів збагачення рідкіснометалічних руд Маріупольського цирконового родовища. Модель застосована для визначення оптимальних режимів та розробки алгоритму оптимального управління процесом осадження суспензії у радіальному згущувачі.

In work it is developed and analysed regression model of process of sedimentation of a dispersive phase of tails of enrichment cyanide ores of the Mariupol deposit, and it is offered algorithm of extreme management of batching flowculants in a densifier.

1. Стальский В. В. Автоматизация управления процессами обезвоживания на обогатительных фабриках. - М.: Недра, 1977. – 200 с.
2. Автоматизация производства на углеобогатительных фабриках / Л. Г. Мелькумов, В. А. Ульшин, М. А. Бастунский и др. - М.: Недра, 1983. - 295 с.
3. Головков Б. Ю., Колпиков Г. Г., Рейбман Л. А. Автоматизация калийных обогатительных фабрик. - М.: Недра, 1983. - 200 с.
4. Папушин Ю.Л., Самойлов А.И. К вопросу автоматического управления процессом сгущения отходов флотации / Наукові праці Дон. держ.техн. універ. Вип. 42, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: Дон ДТУ, 2002. – С.187 - 191.
4. Небера В.П. Флокуляция минеральных суспензий. - М.: Недра, 1983. - 288 с.
5. Білецький В.С., Шпильовий Л.В. Оптимізація режиму осадження твердої фази у згущувачі // Складні системи і процеси. – 2002, №2. – с. 78 – 82.
6. Шпильовий Л.В., Білецький В.С., Сергеев П.В. Математичне моделювання процесу осадження твердої фази хвостів флотації рідкісно-металічних руд // Вісник Криворізького технічного університету. Вип. 3.: Зб. наук. пр. - Кривий Ріг: КТУ, 2004.
7. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
8. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. Богданова О.С., Ненарокова Ю.Ф., 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1984. - 358 с.
9. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии. /Под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1990. – 272 с.
10. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327с.
12. Барбин М.Б. О влиянии ПАВ и рН среды на отстаивание и фильтрование // Изв. ВУЗ. - Цветные металлы. - 1993, № 3-4. – с. 2 - 4
13. Пат. №65879 А Україна, МКВ<sup>3</sup> В 01D 21/00. Спосіб автоматичного керування процесом осадження твердої фази / Шпильовий Л.В., Білецький В.С.; Заяв. 01.09.03; Опубл. 15.04.04, Бюл. № 4. – 2 с.
14. Барский Л. А., Козин В. С. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1977. – 486 с.

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.017

### АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІМОВІРНІСНИХ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ЗОВНІШНЬОГО ОБВОДУ ЛІТАКА

Казак В.М., Гальченко С.М., Завгородній С.О.

**Вступ.** Аналіз публікацій показує, що кількість авіаційних пригод (АП) у світі залишається досить стабільною у перерахунку на виконаний обсяг робіт (відносно мільйона тонно-кілометрів або мільйона перевезених пасажирів). В той же час, статистика Міждержавного авіаційного комітету (МАК) свідчить: якщо в 1982-1992 роках мали місце дві-три катастрофи на 1 мільйон годин нальоту, то за останнє десятиріччя їх кількість потроїлась! За даними Міжнародної організації цивільної авіації (ІСАО) причинами більшості АП є: помилки екіпажів, несправність авіаційної техніки, вплив зовнішнього середовища, помилки служби управління повітряним рухом (УПР) та неякісне технічне обслуговування наземними службами. За статистичними даними в період з 1995 до 2005 року відносна частка причин АП майже не змінилася (рис. 1).

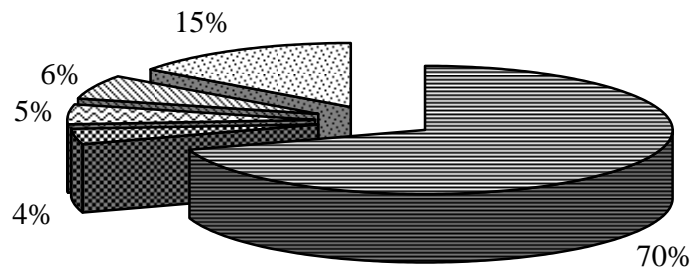


Рис. 1 Розподіл авіаційних пригод за останні 10 років: ■ – помилки екіпажів, ■ – несправність авіаційної техніки, ■ – вплив зовнішнього середовища, ■ – помилки служби УПР, ■ – неякісне технічне обслуговування.

Аналіз наведених даних показує, що найбільший відсоток (79 %) авіапригод припадає на негативний вплив людського фактору, який залежить від кваліфікації льотного та інженерно-технічного складу, стратегії організації технічного обслуговування, додержання правил та прийомів технічної та льотної експлуатації. І тільки 21 % усіх АП трапилось по причині несправності чи відмові авіаційної техніки (15 %) чи під впливом несприятливих умов зовнішнього середовища. Однак необхідно також відмітити, що авіапригоди практично ніколи не бувають наслідком якоїсь однієї причини. Зазвичай вони виникають в результаті взаємозв'язку кількох причин. Взяті поодиноці, ці причини можуть здатися несуттєвими, але в сукупності з іншими вони здатні скласти послідовність зовнішньо не пов'язаних одна з одною подій, які призводять до АП. Так, відносно велика частка помилок членів екіпажу пояснюється не лише професійною некомпетентністю або недисциплінованістю, а й збігом обставин, за яких несприятливі зовнішні умови та відмови техніки ініціюють небезпечний перебіг подій. Зокрема, аналіз причин авіапригод показує, що більше 8 % передумов і катастроф виникає через раптові механічні пошкодження аеродинамічної поверхні літака (рис. 2, 3), які в свою чергу призводять до

раптової зміни льотно-технічних характеристик ЛА.

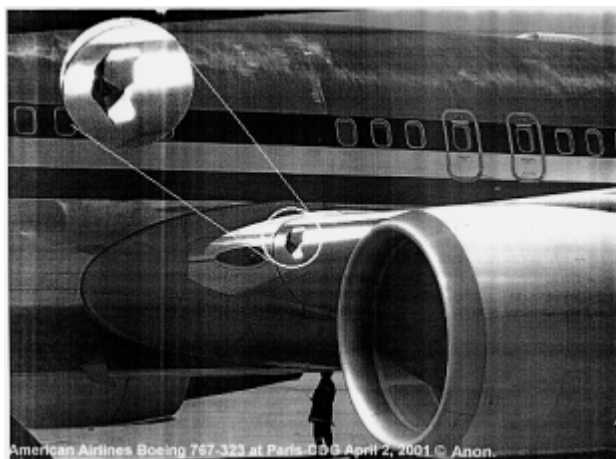


Рис. 2 Пошкодження зовнішнього обводу крила літака «Боїнг 767», які виникли в результаті зіткнення зі стаєю птахів на висоті 3 600 м (ушкодження передньої кромки крила у вигляді вм'ятини з розривом).

Детальніший аналіз факторів, які спричиняють раптові пошкодження зовнішнього обводу літака дає можливість виділити три основні групи причин: зіткнення з механічними чи біологічними об'єктами або формуваннями (осколка бетону, гравію, резини шини шасі, птахами та інші); електростатичні розряди та блискавки; хімічні процеси які відбуваються в металі конструкції літака як при попаданні на поверхню реактивних речовин, так і більш довготривалі пов'язані з умовами експлуатації літака (корозія, старіння та руйнування металу тощо). Як результат – повне або часткове руйнування конструкції літака в процесі експлуатації, наприклад, обриви керуючих поверхонь, закрилків, пробої, розриви зовнішньої обшивки, вм'ятини із розривами (рис. 2), одиночні або групові вм'ятини (рис. 3), хвилястості зовнішнього обводу літака тощо.

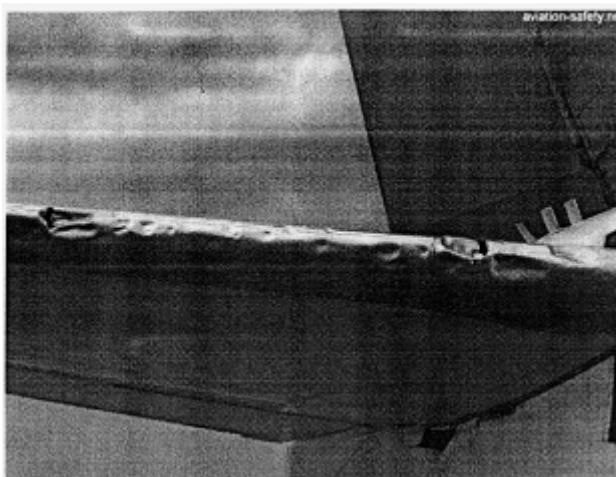


Рис. 3 Ушкодження стабілізатора стаєю птахів (серія вм'ятин).

Небезпека раптових пошкоджень полягає в тому, що їх поява обумовлена дією процесів, хід яких не контролюється, тому передбачити її неможливо. Враховуючи цей факт виникає необхідність у розробці методів діагностування зовнішнього обводу літака та класифікації його стану в польоті.

**Метою даної роботи** є дослідження імовірнісних методів розпізнавання та аналіз

можливості їх застосування для виявлення пошкоджень зовнішнього обводу літака.

**Викладення основних результатів.** Класифікація стану зовнішніх обводів літака при їх діагностуванні є віднесення його до одного з можливих класів. Чисельність класів визначається особливостями задач і цілей дослідження. Сукупність послідовних дій у процесі класифікації називають алгоритмом класифікації [3]. Аналіз публікацій [1, 2, 4, 5] показує, що найбільш розповсюдженим є два підходи до рішення проблеми класифікації пошкоджень зовнішніх обводів ЛА: імовірнісний та детерміністичний.

При імовірнісному підході постановка задачі класифікації полягає у наступному. Є система, яка знаходиться у одному з  $S$  випадкових станів  $D_i$ . Відома сукупність ознак  $k = (k_1, k_2, \dots, k_n)$ , кожна з яких із відповідною імовірністю характеризує стан динамічної системи (ДС). Необхідно побудувати алгоритм за допомогою якого пред'являема сукупність ознак була б віднесена до одного з можливих станів. Потрібно також оцінити вірогідність прийнятого рішення, а також степінь ризику помилкового рішення.

Постановка задачі при детерміністичних методах наступна. ДС характеризується  $n$ -мірним вектором визначальних ознак. Будь-який стан ДС представляє собою точку в  $n$ -мірному просторі ознак. Стану зовнішніх обводів ЛА властива множина класів  $D_i$  (характерів ушкоджень). Вимагається знайти алгоритм за яким вектор визначальних параметрів буде віднесений до визначеної області станів

$$Y^{(n)}(\tau_k) = \{y_j(\tau_k), j = 1, \dots, n\}, \tau_k \in [t_o, t_k],$$

де  $y_j(\tau_k) = A_j(\tau_k)[U_j(\tau_k)]$  – оцінка  $j$ -го визначального параметру.

Найповнішим відображенням можливих класифікованих станів (КС) будь-якої діагностичної системи буде вектор його станів, що у довільному перетині  $\tau_k$  можна описати як

$$P(\tau_k) = \{P(S, \tau_k), S = 1, \dots, M\}, \tau_k \in [t_o, t_k],$$

де  $P(S, t_k) = P[E(S, t_k)]$ ,  $S = 1, \dots, M$  – безумовна імовірність перебування вектора станів у перетині  $t_k$  у  $S$ -у  $k_e$ , що задовольняє умову нормування, тобто

$$\sum_{S \in E} P(S, \tau_k) = 1, P(S, \tau_k) \geq 0, \tau_k \in [t_o, t_k], \quad (1)$$

де  $S = 1, \dots, M$  – випадковий дискретний процес.

Співвідношення (1) виражає твердження: у будь-якому довільно узятому перетині  $\tau_k$  ДС обов'язково знаходиться в одному і тільки в одному з можливих КС. Із теорії оцінювання відомо, що якість функціонування системи класифікації оцінюється сукупністю безумовних імовірностей прийняття рішення про перебування системи в одному з можливих КС, що складають вектор прийняття рішень:

$$Q(S, \tau_k) = \{Q(S, \tau_k), S = 1, \dots, M\}, \tau_k = [t_o, t_k],$$

де  $Q(S, \tau_k) = P[D(S, \tau_k)]$ ,  $S = 1, \dots, M$  – безумовна імовірність прийняття рішення про перебування об'єкта в  $S$ -му КС. Вона також задовольняє умови нормування і є невід'ємною величиною, тобто

$$\sum_{\xi \in D} Q(S, \tau_k) = 1, Q(S, \tau_k) \geq 0, \tau_k \in [t_o, t_k]. \quad (2)$$

Вираз (2) визначає умову, відповідно до якої в результаті класифікації динамічна система обов'язково буде віднесена до одного з можливих КС.

У процесі класифікації станів ПС або його систем можливі похибки перетворення вектора стану у вектор розв'язків. Це призведе до можливих помилок класифікації станів

об'єкта (системи). Можливість появи помилок можна оцінити кількісно через умовну імовірність прийняття рішення за результатами класифікації

$$\omega_{ij}(\tau) = P\{D(j, \tau_k) / E(i, \tau_k)\}, (i, j) \in E, \tau_k = [t_0, t_k], \quad (3)$$

де  $E(i, \tau_k)$  – вектор можливих переходів з вектора станів у вектор розв'язків;  $D(j, \tau_k)$  – вектор можливих класів.

У виразі (3) і в позначенні  $\omega_{ij}(\tau_k)$  означає фактичний стан ДС, а індекс  $j$ -номер класу, до якого він буде віднесений за результатами класифікації.

Для розпізнавання станів використовують статистичні методи та методи статистичних рішень. Зі статистичних методів ідентифікації стану ДС найбільшого практичного застосування набули метод з використанням теореми гіпотез (метод Баєса) і метод послідовного аналізу (метод Вальда); серед методів статистичних рішень – статистичні рішення для одного діагностичного параметра, метод мінімального ризику, метод мінімальної кількості помилкових рішень, метод мінімакса, метод Неймана–Пірсона і метод найбільшої правдоподібності. Вибір конкретного методу буде залежати від поставленої задачі розпізнавання і кількості станів системи.

Так, умовну ймовірність помилки прийняття рішення за результатами класифікації стану зовнішнього обводу літака можна визначити, скориставшись узагальненою формулою Байєса:

$$P(D(S, \tau_k) / E(S, \tau_k)) = \frac{P(D(S, \tau_k))P(E(S, \tau_k) / D(S, \tau_k))}{\sum_{\xi \in E} P(D(\xi, \tau_k))P(E(S, \tau_k) / D(\xi, \tau_k))}. \quad (4)$$

Вирішальне правило методу Баєса матиме наступний вид: об'єкт з набором ознак  $k$  відноситься до діагнозу  $D(S, \tau_k)$  з найбільшою апостеріорною імовірністю.

Аналіз виразів (3) і (4) показує, що в загальному випадку умовні імовірності станів залежать не тільки від початкового  $t_0$  і кінцевого  $t_k$  часу, але і від тимчасового моменту переходу системи зі стану  $i$  у стан  $j$ . Як і в попередніх виразах, умовна імовірність  $\omega_{ij}(\tau)$  невід'ємна і нормується, тобто

$$\sum_{i \in E} \omega_{ij}(\tau_k) = 1, \quad \omega_{ij}(\tau_k) \geq 0, \quad i \in E.$$

На відміну від теореми гіпотез метод Вальда не обмежує кількість можливих переходів з вектора станів у вектор рішень  $D(S, \tau_k)$ . Він тільки обмежує кількість можливих класів. Можливих переходів може бути стільки, скільки необхідно для прийняття рішення з визначеним ступенем ризику. Ступінь ризику зазвичай, задається наперед. Оцінимо можливість застосування методу Вальда для класифікації аеродинамічного і технічного станів ЛА, що має два стійкі класи станів. За аналогією з виразом (4) можна записати

$$\begin{aligned} & \frac{P(D_2(S, \tau_k) / E(S, \tau_k))}{P(D_1(S, \tau_k) / E(S, \tau_k))} = \\ & = \frac{P(D_2(S, \tau_k))P(E_1(S, \tau_k) / D_2(S, \tau_k)) \cdots P(E_i(S, \tau_k) / D_2(S, \tau_k))}{P(D_1(S, \tau_k))P(E_1(S, \tau_k) / D_1(S, \tau_k)) \cdots P(E_j(S, \tau_k) / D_1(S, \tau_k))}, \quad (5) \\ & E(S, \tau_k) = \{E_1(S, \tau_k), E_2(S, \tau_k), \dots, E_j(S, \tau_k)\}, j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Із рівняння (5) можна визначити вирішальне правило класифікації стану обводів літака. Якщо відношення чисельника до знаменника лівої частини виразу (5) задовольняє нерівність



$$\frac{P(D_2(S, \tau_k) / E(S, \tau_k))}{P(D_1(S, \tau_k) / E(S, \tau_k))} > 1,$$

то приймається рішення щодо того, що за результатами класифікації система належить до вектора можливих класів  $D_2(S, \tau_k)$  у перетині  $\tau_k$ .

Під час класифікації аеродинамічного чи технічного стану ЛА і його устаткування із застосуванням методу Вальда можуть бути двоякі помилки. Помилка, що стосується вектора можливих класів  $D_1(S, \tau_k)$ , полягає в тому, що приймається рішення про перехід ЛА або його системи у вектор можливих класів  $D_2(S, \tau_k)$ , у той час, як система чи ЛА в цілому належить вектору можливих класів  $D_1(S, \tau_k)$ . Помилка, що відноситься до вектора можливих класів  $D_2(S, \tau_k)$ , за якою приймається рішення на користь  $D_1(S, \tau_k)$  у той час, як система (ЛА) належить вектору  $D_2(S, \tau_k)$ . Ці помилки можна віднести до розряду помилок першого роду в першому випадку і другого роду в другому випадку.

Тому можна стверджувати, що статистичний метод Вальда можна застосувати для вирішення завдання класифікації стану літака і його систем за наявності в них вузлів і агрегатів, що мають два виражені вектори можливих станів.

Для зниження кількості помилок першого і другого роду при класифікації станів ЛА і його систем можна скористатися теорією методів статистичних рішень. Зокрема для поодиначних пошкоджень пропонується класифікацію стану об'єкта проводити з використанням методів статистичних рішень за одним узагальненим параметром та мінімального ризику. При цьому узагальнений параметр  $U$  має максимально повно характеризувати стан поверхні літака чи його систем, а класифікація станів полягає у виборі такого граничного значення параметра  $U_0$ , щоб за ним можна було б розробити вирішальне правило переходів з вектора станів у вектор розв'язків, тобто

$$\left. \begin{aligned} U \in E_1(S, \tau_k), \text{ при } U \leq U_0, \\ U \in E_2(S, \tau_k), \text{ при } U > U_0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

З рис. 4 видно, що області  $f(U/D_1(S, \tau_k))$  і  $f(U/D_2(S, \tau_k))$  перетинаються, утворюючи дві області (заштриховані на рис. 4), тому принципово важко вибрати значення  $U_0$ , за якого вирішальне правило (6) не давало б помилкових рішень. Потрібно визначити оптимальне значення  $U_0$ .

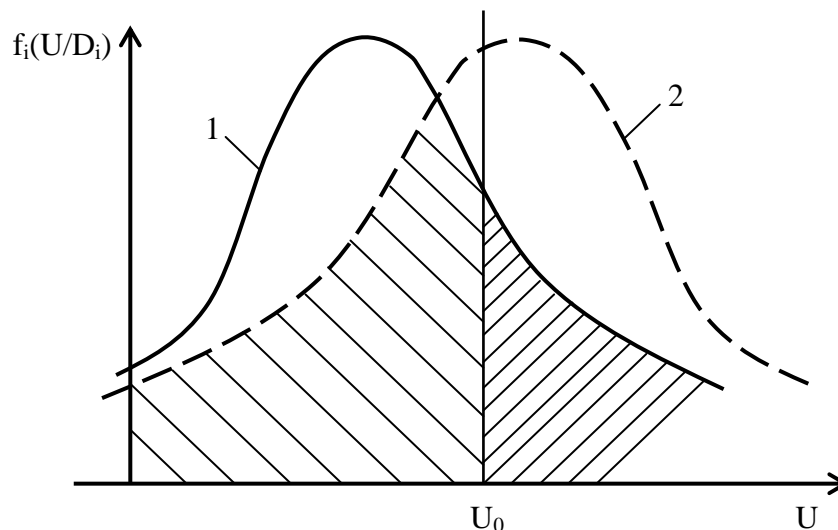


Рис. 4 Функції щільностей розподілу ймовірностей параметра у справному та відмовному станах: 1 –  $f_1(U/D_1(S, \tau_k))$ ; 2 –  $f_2(U/D_2(S, \tau_k))$ .

Аналіз значень кривих на рис. 4 і вирішального правила (6) дозволяє зробити висновки, що з урахуванням помилкових рішень у дослідженнях будуть наявні події  $H_{11}$ ,

$H_{12}$ ,  $H_{21}$ ,  $H_{22}$ , що складають повну групу несумісних подій:  $H_{11}$  – подія, яка полягає в тому, що стан системи належить вектору можливих класів  $D_1(S, \tau_k)$  і за результатами ідентифікації воно належить до  $D_1(S, \tau_k)$ ;  $H_{12}$  – подія, яка полягає в тому, що стан системи належить вектору  $D_1(S, \tau_k)$ , а за результатами ідентифікації належить до вектора  $D_2(S, \tau_k)$ ;  $H_{21}$  – подія, яка полягає в тому, що стан системи належить вектору  $D_2(S, \tau_k)$ , а за результатами ідентифікації належить до вектора  $D_1(S, \tau_k)$ ;  $H_{22}$  – подія, яка полягає в тому, що стан системи належить вектору  $D_2(S, \tau_k)$  і за результатами ідентифікації належить до вектора  $D_2(S, \tau_k)$ . Наведені ймовірності можна визначити:

$$\begin{aligned}
 P(H_{11}) &= P(D_1(S, \tau_k)) \int_{-\infty}^{U_0} f(U/D_1(S, \tau_k)) dU; \\
 P(H_{12}) &= P(D_1(S, \tau_k)) \int_{U_0}^{\infty} f(U/D_1(S, \tau_k)) dU; \\
 P(H_{21}) &= P(D_2(S, \tau_k)) \int_{-\infty}^{U_0} f(U/D_2(S, \tau_k)) dU; \\
 P(H_{22}) &= P(D_2(S, \tau_k)) \int_{U_0}^{\infty} f(U/D_2(S, \tau_k)) dU.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Крім того, кожна з чотирьох імовірнісних помилок має свою ціну  $C_{ij}$ . Очевидно, що якщо є помилки, то є і ризик їх появи. З урахуванням виразів (7) неважко визначити середній ризик ідентифікації аеродинамічного і технічного стану ЛА і його систем:

$$\begin{aligned}
 \rho(D(S, \tau_k)) &= C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{U_0} f(U/D_1(S, \tau_k)) dU + \\
 &+ C_{12}P_1 \int_{U_0}^{\infty} f(U/D_1(S, \tau_k)) dU + C_{21}P_2 \int_{-\infty}^{U_0} f(U/D_2(S, \tau_k)) dU + \\
 &+ C_{22}P_2 \int_{U_0}^{\infty} f(U/D_2(S, \tau_k)) dU,
 \end{aligned} \tag{8}$$

де  $P_1 = P(D_1(S, \tau_k))$ ,  $P_2 = P(D_2(S, \tau_k))$ .

Вираз (8) дозволяє знайти граничне значення узагальненого параметра  $U_0$  з умови мінімального середнього ризику. Для цього продиференціюємо його і прирівняємо похідну до нуля:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho(D(S, \tau_k))}{\partial U_0} &= C_{11}P_1 f(U/D_1(S, \tau_k)) - C_{12}P_1 f(U/D_1(S, \tau_k)) + \\
 &+ C_{21}P_2 f(U/D_2(S, \tau_k)) - C_{22}P_2 f(U/D_2(S, \tau_k)).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Вираз (9) являє собою умову екстремуму середнього ризику. Перепишемо його у вигляді:

$$\frac{f(U/D_1(S, \tau_k))}{f(U/D_2(S, \tau_k))} = \frac{C_{21} - C_{22}}{C_{12} - C_{11}} \cdot \frac{P_2}{P_1}. \tag{10}$$

З аналізу виразу (10) випливає, що він визначає два значення  $U_0$ , однак тільки одне з них відповідає мінімальному значенню середнього ризику  $\rho(D(S, \tau_k))$ . Для його визначення візьмемо другу похідну і, щоб результат дійсно відповідав мінімуму  $\rho(D(S, \tau_k))$ , запишемо умову його одержання

$$\frac{\partial^2 \rho(D(S, \tau_k))}{\partial U_0^2} > 0, \text{ чи } \frac{f'(U/D_1(S, \tau_k))}{f'(U/D_2(S, \tau_k))} = \frac{C_{21} - C_{22}}{C_{12} - C_{11}} \cdot \frac{P_2}{P_1} > 0. \quad (11)$$

Із рівняння (11) можна вивести вирішальне правило переходу з вектора станів у вектор розв'язків, ідентифікуючи аеродинамічний чи технічний стан ЛА і його системи:

$$U \in E_1(S, \tau_k), \text{ якщо } \frac{f(U/E_1(S, \tau_k))}{f(U/E_2(S, \tau_k))} > \frac{C_{21} - C_{22}}{C_{12} - C_{11}} \cdot \frac{P_2}{P_1};$$

$$U \in E_2(S, \tau_k), \text{ якщо } \frac{f(U/E_1(S, \tau_k))}{f(U/E_2(S, \tau_k))} < \frac{C_{21} - C_{22}}{C_{12} - C_{11}} \cdot \frac{P_2}{P_1}.$$

**Висновок.** Таким чином, в результаті проведеного в роботі аналізу імовірнісних методів розпізнавання для виявлення пошкоджень поверхні літака можна зробити наступні висновки:

- при одиночних пошкодженнях зовнішнього обводу літака, коли мають місце два стійкі стани, доцільно застосовувати статистичний метод Вальда, який на відміну від методу Баєса не обмежує кількість можливих переходів з вектора станів у вектор рішень;
- застосовуючи методи статистичних рішень можна вибрати значення визначального узагальненого параметра з умов мінімального середнього ризику.

In this work has be done research of probability methods of recognition and the analysis of an opportunity of their application with the purpose of recognition of a status of external contour of the flying device in flight.

1. Ищенко С.А., Давидов А.Р. Разработка методов контроля и диагностики аэродинамического состояния судов ГА. – К.: Знание, 1990. – 44 с.
2. Казак В.М., Гальченко С.М. Діагностування аеродинамічної поверхні літальних апаратів // Вісн. НАУ. – 2002. – № 4. – С. 46-49.
3. Казак В.М., Зюзько А.К. Основи експрес-діагностування: Навч. посібник. – К.: НАУ, 2005. – 184 с.
4. Касьянов В.А., Ударцев Е.П. Определение характеристик воздушных судов методами идентификации. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.
5. Кузьмин В.Ф. Обеспечение Требований к аэродинамическим обводам самолета в авиационном производстве. – М.: Машиностроение, 2002. – 272 с.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ  
БИКАНАЛЬНОЙ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Квасников В.П., Баранов А.Г.

**Введение**

В современных условиях промышленного производства достаточно большое влияние на точность координатных измерений оказывают дестабилизирующие факторы.

Координатно-измерительные машины (КИМ) хотя и являются все еще дорогостоящим оборудованием, однако, являются высокоточными средствами измерения, повышающие качество продукции, за счет резкого снижения бракованных деталей попадающих на сборку, а также снижают стоимость контрольных операций.

Эффективность использования КИМ зависит не только от технических характеристик машины (скорость перемещения, точность измерения и т.д.), но и от условий в которых она эксплуатируется и обслуживается [1,2].

**Постановка задачи**

Определить оптимальные условия окружающей среды для проведения точных измерений и возможность гашения высокочастотных колебаний в опорах с газовой смазкой, а также виброопор.

**Решение задачи**

Погрешность измерения одним и тем же средством измерения могут колебаться в больших пределах и из-за температуры измеряемой детали. Изменение одного метра измеряемой детали при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  ее размер изменится (увеличится) на 11,5 мкм для материала стали из которой делают концевые меры. В каждой стране издаются так называемые РТМ (руководящие технические материалы). На основании этих материалов производится эксплуатации всевозможного оборудования.

Нормальной температурой эксплуатации КИМ считается:

- температура  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ;
- температура в месте расположения машины  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ;
- отклонение температуры на протяжении 8 часов  $2^{\circ}\text{C}$ ;
- отклонение температуры внутри машины  $1^{\circ}\text{C}$ .

При измерении линейных размеров деталей с одинаковой во всем объеме температурой, отличной от  $18^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ , значительный положительный эффект для повышения точности измерений достигается компенсацией линейных температурных деформаций. Программное обеспечение ряда КИМ содержит функции компенсации температурных деформаций по вводимым данным о фактической температуре и о реальных коэффициентах линейного расширения измерительных линеек и деталей [3].

Обеспечение надлежащей окружающей среды для эксплуатации возлагается на пользователя машины. На пользователя возлагается ответственность за проведение испытаний по оценке воздействия окружающей среды на месте установки машины.

Таким образом, необходимо понимать, что указываемые погрешности для КИМ соответствуют всегда  $20^{\circ}\text{C}$ . За рубежом КИМы устанавливаются иногда в производственных цехах и тогда для них устанавливают термостатированные кабины работающие в автоматическом режиме. Причем детали устанавливаются на специальные паллеты на части территории этих кабин, а затем специальным транспортным устройством направляются в рабочую зону для измерения на КИМ.

В связи с появлением прецизионных КИМ возникла необходимость в создании термоконстантных кабин с поддержанием температуры  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Это достигается за счет кондиционеров и специальной вентиляции.

КИМ не должна подвергаться воздействию прямого солнечного света или других источников лучистой энергии. Прочие источники лучистой энергии (например, люминесцентные лампы) по возможности должны быть удалены на расстояние не менее 10 длин наибольшей оси машины. Если эти требования по какой либо причине не приемлемы с практической точки зрения, следует применять не прямые источники света, а пользоваться рассеянным, отраженным светом с увеличенной оптической длиной дуги.

Другим дестабилизирующим фактором является вибрация. Для повышения точности перемещений и позиционирования рабочих органов КИМ, является применение направляющих с малой силой трения, которыми являются опоры с газовой смазкой.

Однако для успешного использования таких опор необходимо провести теоретические исследования влияния возбуждаемых колебаний на динамические характеристики узла трения с учетом упругих свойств контактной поверхности и внешних сил. Наиболее точные результаты дает исследование методом математического моделирования.

На рис.1 представлена динамическая модель опоры с газовой смазкой.

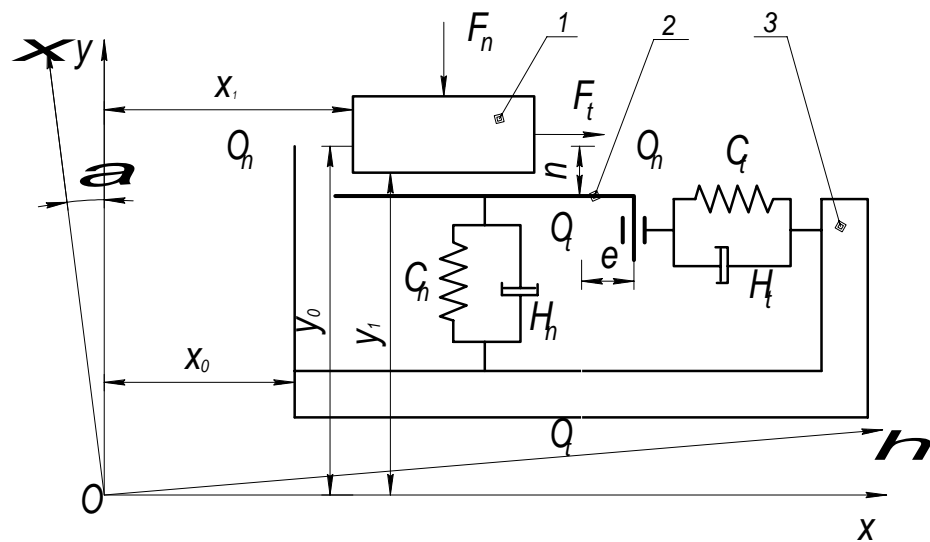


Рис. 1 Динамическая модель направляющих координатно-измерительной машины

Перемещающийся ползун 1 массой  $m$  движется по контактной поверхности 2 направляющих 3. На ползун действуют постоянная внешняя сила  $F_n$ , прижимающая его к контактной поверхности, и перпендикулярная ей постоянная сдвигающая сила  $F_t$ , приводящая ползун в движение.

Оси  $O_n - O_n$  и  $O_t - O_t$  являются положениями равновесия контактной поверхности 2 с ползуном 1 соответственно в нормальном и тангенциальном направлениях. Движение ползуна описывается координатами  $x_1$  и  $y_1$ . В общем случае направляющие совершают колебания  $\eta_0$  и  $\xi_0$  относительно осей  $O\eta$  и  $O\xi$ , система координат которых  $\eta O\xi$  повернута относительно системы координат  $xOy$  на угол  $\alpha$  по закону

$$\begin{aligned} \eta_0 &= A \cdot \sin \omega t, \\ \xi_0 &= B \cdot \cos \omega t, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $A, B$  – амплитуда возбуждаемых колебаний,  $\omega$  – круговая частота возбуждаемых колебаний,  $t$  – время.

В этом случае координаты колебания направляющих

$$\begin{aligned} x_0 &= \eta_0 \cos \alpha - \xi_0 \sin \alpha, \\ y_0 &= \eta_0 \sin \alpha + \xi_0 \cos \alpha, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $x_0, y_0$  – моментная амплитуда возбуждения направляющих,  $\eta_0, \xi_0$  – моментная амплитуда возбуждаемых колебаний.

В зависимости от характера движения ползуна возможны два режима его работы: движение ползуна со скольжением над контактной поверхностью, происходящее при условии

$$y_0 = y_1 + n, \quad (3)$$

где  $y_1$  – координата ползуна,  $n$  – координата контактной поверхности, и описываемое системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + F_{TP}(v_{12}) = F_t, \\ m\ddot{y}_1 + P_n = -F_n, \\ -F_{TP}(v_{12}) + P_t = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $m$  – масса ползуна,  $x_1, y_1$  – координата ползуна,  $F_{TP}(v_{12})$  – сила трения ползуна,  $v_{12}$  – скорость перемещения ползуна относительно контактной поверхности,  $F_t, F_n$  – внешние силы,  $P_n, P_t$  – силы деформации контактной поверхности, движение ползуна со скольжением над контактной поверхностью с большим отрывом возникшим, в следствии, интенсивности возбуждаемых колебаний

$$y_0 \leq y_1 + n, \quad (5)$$

и описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = F_t, \\ m\ddot{y}_1 = -F_n, \\ P_n = 0, \\ P_t = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Если нормальные и тангенциальные силы в системах дифференциальных уравнений (4) и (6) принимаются в виде

$$P_n = H_n(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + C_n(y_1 - y_0), \quad (7)$$

$$P_t = H_t\dot{e} + C_t e, \quad (8)$$

где  $H_n, H_t$  – вязкое сопротивление,  $C_n, C_t$  – контактная жесткость,  $e$  – координата контактной поверхности,

сила трения между ползуном и контактной поверхностью

$$F_{TP}(v_{12}) = P_n f_0 \text{sign } v_{12} + f_1 v_{12}, \quad (9)$$

где  $f_0, f_1$  – коэффициенты трения,

а скорость ползуна относительно контактной поверхности определяется по уравнению

$$v_{12} = \dot{x}_1 - (\dot{x}_0 + \dot{e}). \quad (10)$$

Тогда уравнения (2), (7) – (10) принимают вид:

$$P_n = h_n (y'_1 - y'_0) + (y_1 - y_0),$$

$$P_t = h_t e' + e,$$

$$F_{TP}(v_{12}) = P_n f_0 \text{sign } v_{12} + \gamma^{1/2} f_1 v_{12},$$

$$v_{12} = x'_1 - x'_0 - e',$$

$$x_0 = k_A A \sin k_v \tau v_x \cos \alpha - k_B B \cos \tau v_y \sin \alpha,$$

$$y_0 = k_A A \sin k_v \tau v_x \sin \alpha + k_B B \cos \tau v_y \cos \alpha,$$

где  $h_n, h_t$  – коэффициенты сопротивления,  $k_A, k_B$  – коэффициенты амплитуды колебания,  $\tau$  – безразмерное время.

Рассмотрим динамические характеристики системы. Основной временной характеристикой системы в установившемся виброударном режиме движения является время его скольжением над контактной поверхностью с большим отрывом  $\tau_k$ , характеризуемое соотношением [4]

$$\Delta_{\tau} = \frac{\tau_k}{pT} = \frac{\tau_k}{\tau_k + \tau_0},$$

где  $p$  – целые периоды возбуждаемых колебаний,  $T$  – период возбуждаемых колебаний,  $\tau_k$ ,  $\tau_0$  – безразмерное время движения ползуна с отрывом и большим отрывом.

Увеличение  $\Delta_{\tau}$  за период установившегося движение ползуна свидетельствует об увеличении времени его движения над контактной поверхностью с большим отрывом, что является причиной снижения силы трения. Наибольшее сокращение времени  $\Delta_{\tau}$  происходит при резонансных колебаниях ползуна, что объясняется резким возрастанием амплитуды его бесконтактного движения.

Опорная поверхность (пол, фундамент, изолирующая подушка и т.д.) на которую устанавливают машину, под воздействием внешних сил, возникающих в непосредственном окружении машины, может оказывать вредное влияние на общую точность измерения и повторяемость (особенно на зазор датчиков положения и величину аэростатического зазора воздушных опор). Типовая схема фундамента под КИМ приведена на рис.2.

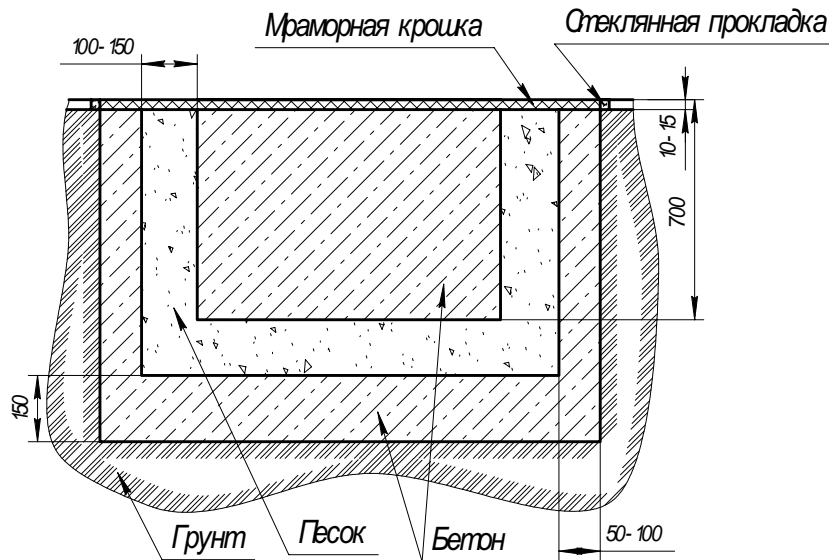


Рис. 2 Типовая схема фундамента для КИМ

Оператор-метролог проводящий измерения отвечает за выбор места эксплуатации КИМ и обязан предоставить производителю машины характеристики амплитуды, частоты колебаний верхней поверхности фундамента и место расположения КИМ.

Для биканальной КИМ [5, 6] усилие на щуп машины второго канала измерения не должно превышать 30 г. При этом, в момент контакта щупа (шарика) с деталью в течении 2-5 секунд перемещения щупа должны отсутствовать. Все механизмы фиксации перемещений по координатам должны быть разблокированы. Максимальный уход показаний перемещения следует считать амплитудой вибрации машины по данной оси. Испытания проводить по каждому из объединенных направлений КИМ. Допустимая амплитуда 1 мкм РР (смещение) для частоты колебаний менее 10 Hz.

Относительная влажность для системы компьютера, структуры машины и материалов из которых она изготовлена, должна быть в пределах 50%±20%.

#### **Вывод**

Проанализировано влияния дестабилизирующих факторов на работу биканальной координатно-измерительной машины. Описаны оптимальные условия работы машины необходимые для проведения точных измерений. А также определено, что стабильность скорости перемещения ползуна является функцией частоты возбуждаемых колебаний и

мало зависит от параметров системы. Наибольшая плавность перемещения достигается при возбуждении частотой, превышающей резонансную.

The necessary optimum terms for conducting of the exact measurements of multichannel coordinate-measuring machine are described in the article , it is shown, that stability of speed of moving of slide-block is the function of frequency of the excited vibrations and small depends of the parameters of the system.

1. Сазыкин В.Т. Формирование основных требований к новому поколению автоматизированных систем управления // Промышленная энергетика. – 1995. – №8. – С. 19-24.
2. Квасніков В.П. Оптимальне керування процесом гасіння коливань базової частини трикоординатної інформаційно-вимірювальної системи // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – 2003. – №13. – С. 120–123.
3. Гапшис В.–А.А., Каспарайтис А.Ю., Модестов М.Б., Раманаускас В.–З.А., Серков Н.А., Чудов В.А. Координатные измерительные машины и их применение. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
4. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. Т.2 /Под ред. И.В.Крагельского, В.В.Алишина. М., 1979. – С.14.
5. Способ измерения формы поверхности детали: А.с. 1753237 СССР, МКИ G 01 В 5/20 / Г.А. Баранов, Р.А. Абубекеров и А.Г. Баранов. – № 4802290/28; Заявлено 18.01.90; Оpubл. 07.08.92. Бюл. № 2. – С.4.
6. Баранов О.Г. Оцінка погрешності 2-х канальної координатно-вимірювальної машини // Вісник ЧІТІ. – 2001. – № 1. – С.18–20.



## КОНТУРНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ

Крылов В.Н., Полякова М.В., Волкова Н.П.

**Постановка проблемы.** Обширная область научно-технических задач предполагает автоматизированную обработку больших объемов видео информации. Одной из самых сложных задач обработки изображений является сегментация. Конечный успех компьютерных процедур обработки изображений во многом определяется качеством сегментации, поэтому значительное внимание должно быть уделено повышению ее помехоустойчивости.

Поэтому актуальной является проблема повышения помехоустойчивости процедуры сегментации изображения. Решение этой проблемы соответствует государственным научно-техническим программам, которые сформулированы в законе Украины «Про научную и научно-техническую деятельность» и в законе Украины «Про национальную программу информатизации».

**Анализ последних публикаций. Нерешенные части общей проблемы.** Одним из наиболее перспективных направлений повышения помехоустойчивости контурной сегментации изображений является использование математической морфологии. Поэтому при обработке изображений широко используется представитель этого направления - метод Канни, согласно которому производится [1]:

- сглаживание изображения с помощью гауссовского фильтра с целью уменьшения аддитивных флуктуационных помех;

- оценка градиента как квадратного корня из суммы квадратов производных по двум ортогональным направлениям с целью подчеркивания перепадов интенсивности изображения;

- пороговая обработка оценки градиента изображения, которая включает немаксимальное подавление скачков интенсивности изображения, состоящее в следующем: величина скачка интенсивности в каждой точке контура полагается равной нулю, если она не превышает величину скачка интенсивности в двух соседних точках по направлению градиента изображения;

- морфологическая обработка контура изображения, при которой задаются два порога на значения интенсивности изображения; к точкам, значение интенсивности в которых превышает верхний порог, присоединяются только соседние с ними точки, значение интенсивности в которых превышает нижний порог.

Немаксимальное подавление скачков интенсивности изображения производится по следующему алгоритму:

- задается направление контура (1, 2, 3, 4) (рис.1.), вычисляются значения интенсивности созданных изображений оценок производных  $I_x(x, y), I_y(x, y)$  в двух ортогональных направлениях  $x, y$ ; а также изображение  $R(x, y)$  оценок градиента:

$$R(x, y) = \sqrt{(I_x(x, y))^2 + (I_y(x, y))^2},$$

где  $x, y$  – пространственные координаты изображения,  $x = 1, \dots, N$ ;  $y = 1, \dots, M$ .

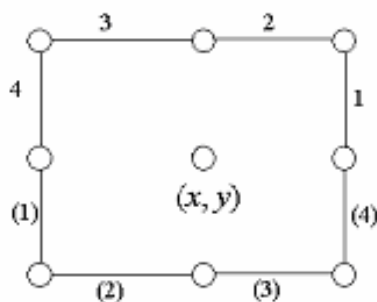


Рис.1 Окрестность точки  $(x, y)$  изображения с обозначенными направлениями, которые анализируются при немаксимальном подавлении скачков интенсивности изображения

- величина оценки градиента в точке  $(x, y)$  изображения определяет величину скачка интенсивности в этой точке;
- вычисляются пространственные координаты  $(x, y)$  точек изображения с заданным (1, 2, 3, 4) направлением вектора градиента  $(I_y(x, y), I_x(x, y))$  путем решения двух систем неравенств; например, для направления 4 эти системы неравенств имеют вид (рис. 2а, б):

$$\begin{cases} I_y(x, y) \leq 0, \\ I_x(x, y) > -I_y(x, y); \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} I_y(x, y) \geq 0, \\ I_x(x, y) < -I_y(x, y); \end{cases}$$

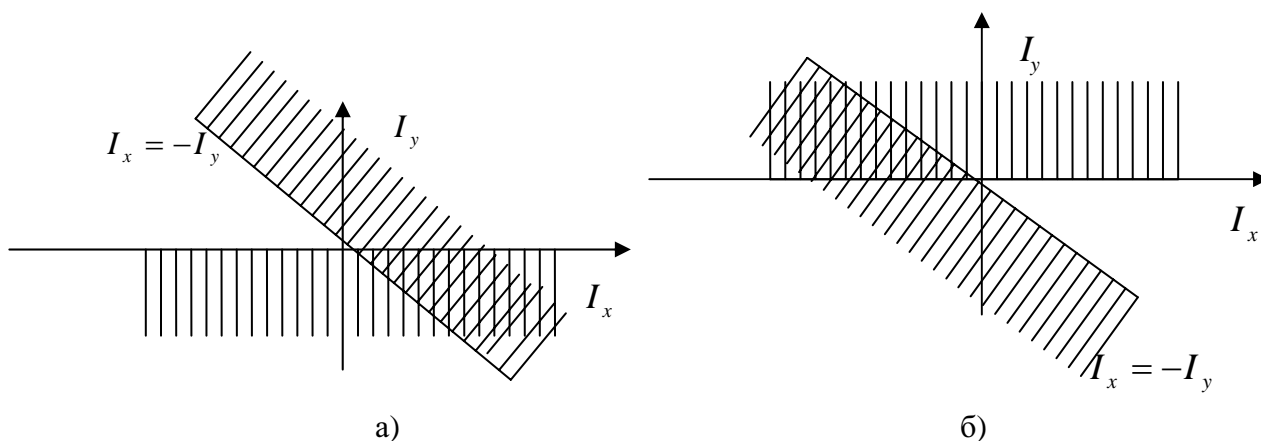


Рис.2 Вычисление пространственных координат  $(x, y)$  точек изображения с заданным направлением 4 вектора градиента

- исключаются точки, лежащие на границах изображения, чтобы ослабить влияния краевого эффекта при оценке градиента изображения;
- производится линейная интерполяция градиента для оставшихся точек, например, для точек  $A$  и  $B$  в направлении 2 (рис.3.) по формулам

$$R_A = d \cdot R(x+1, y+1) + (1-d)R(x, y+1),$$

$$R_B = d \cdot R(x-1, y-1) + (1-d)R(x, y-1),$$

$$d = |I_y(x, y) / I_x(x, y)|;$$

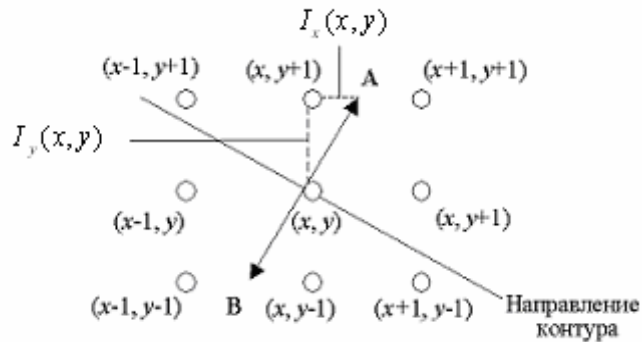


Рис.3 Нахождение локального максимума градиента в направлении 2

— предполагается, что в окрестности каждой точки локального максимума оценка градиента  $R(x, y)$  изображения выпукла;

— находятся локальные максимумы оценки градиента  $R(x, y)$  изображения для каждого из 4-х направлений (рис.1.); например, точка  $(x, y)$  считается точкой локального максимума в направлении 2, если  $R(x, y) > R_A$  или  $R(x, y) > R_B$ .

Преимуществом метода Канни контурной сегментации изображений является использование морфологической операции наращивания точек контура — дилатации, заключающейся в следующем [1]. Пусть  $S$  — множество точек изображения, к которому применяется морфологический оператор,  $B$  — структурный элемент, т. е. произвольное множество точек изображения, определяющее морфологическое расстояние. Множество  $S \oplus B$ , где  $\oplus$  обозначает дилатацию, представляет собой объединение всех точек, попадающих в множество  $B$ , если оно может иметь в качестве центра каждую точку множества  $S$ . Использование морфологической операции в сочетании с немаксимальным подавлением скачков интенсивности изображения улучшает помехоустойчивость метода Канни контурной сегментации, а также повышает визуальное качество контурного препарата.

Несмотря на преимущества, на результат работы метода Канни влияют предварительное сглаживание изображения и подчеркивание перепадов интенсивности изображения путем оценки градиента изображения. Сглаживание значений интенсивности изображения повышает помехоустойчивость любого метода контурной сегментации при высоких и средних значениях отношения сигнал/шум входного изображения. Поэтому применяется подчеркивание перепадов интенсивности изображения с помощью вейвлет-преобразования, сохраняющего помехоустойчивость методов контурной сегментации изображений со сглаживанием, но в меньшей степени зависящего от помеховой ситуации [2]. Методы на основе вейвлет-преобразования обеспечивают также регулируемую детализацию объектов изображения [3], под которой понимается зависимость локальных экстремумов интенсивности контрастированного изображения как от высоты перепада исходного изображения, так и от геометрических размеров объекта на изображении.

Предлагается морфологический метод контурной сегментации изображений на основе гиперболического вейвлет-преобразования (ГПВ), повышающий помехоустойчивость выделения контуров при малых значениях отношения сигнал/шум входного изображения и обеспечивающий регулируемую детализацию объектов изображения.

**Изложение основного материала.** Известно, что непрерывное вейвлет-преобразование  $(f, \psi)(s, b)$  имеет вид:

$$(f, \psi)(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{s}\right) dx, \quad (1)$$

где  $f(x)$  — анализируемая функция,  $\psi(x)$  — вейвлет-функция,  $s$  — параметр масштаба,  $b$  — параметр сдвига.

ГВП определено в [3] как непрерывное вейвлет-преобразование с функцией

$$\psi(x) = \frac{1}{\pi\alpha x} G(x), \quad (2)$$

где  $G(x) = 1(x-\varepsilon) - 1(x-\gamma)$ ,  $1(x)$  — функция Хевисайда,  $G(-x) = G(x)$ ,  $\varepsilon, \gamma$  — константы,  $\alpha$  — масштабирующий коэффициент.

Введем функцию  $\tilde{G}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \gamma, \\ 0, & |x| > \gamma. \end{cases}$  Заметим, что использование функции  $G(x)$  в (2)

производит регуляризацию интеграла (1) по формуле

$$(f, \psi)(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\gamma}^{-\varepsilon} f(x) \frac{s}{\pi\alpha(x-b)} \tilde{G}(x-b) dx + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} f(x) \frac{s}{\pi\alpha(x-b)} (\tilde{G}(x-b) - \tilde{G}(-b)) dx + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{\varepsilon}^{\gamma} f(x) \frac{s}{\pi\alpha(x-b)} \tilde{G}(x-b) dx. \quad (3)$$

Предлагается вместо (3) использовать регуляризацию интеграла (1) вида [4]

$$(f, \psi)(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\gamma}^{-\varepsilon} f(x) \frac{s}{\pi\alpha(x-b)} \tilde{G}(x-b) dx + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} f(x) \frac{s}{\pi\alpha(x-b)} \left\{ \tilde{G}(x-b) - \tilde{G}(-b) + \frac{(x-b)^2}{\varepsilon} \right\} dx + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{\varepsilon}^{\gamma} f(x) \frac{s}{\pi\alpha(x-b)} \tilde{G}(x-b) dx.$$

В результате функция  $G(x) = 1(x-\varepsilon) - 1(x-\gamma)$  в (2) заменяется на функцию

$$G_1(x) = \begin{cases} G(x), & |x| > \varepsilon, \\ \frac{x}{\varepsilon}, & |x| \leq \varepsilon; \end{cases} \quad \text{позволяющую получить преимущества с точки зрения}$$

помехоустойчивости контурной сегментации изображений. График функции  $\frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x}{s}\right)$  с учетом этой замены приведен на рис.4.

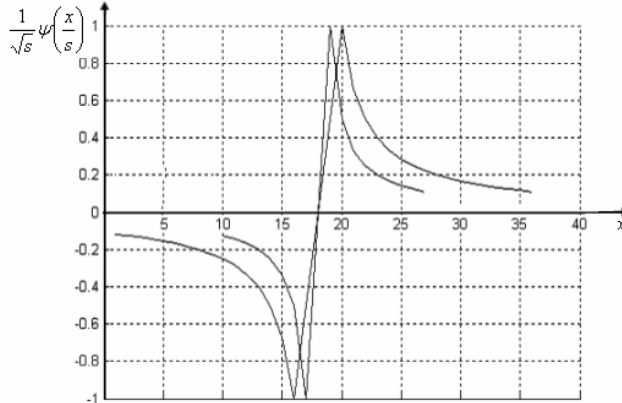


Рис.4 Функции  $\frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x}{s}\right)$  при  $s = 1$  (1);  $2$  (2)

Тогда ГВП представляет собой свертку каждой строки или каждого столбца изображения с фильтрами

$$\{g_s(n)\} = \left\{ \frac{1}{10}, \dots, -\frac{1}{1+2\Delta}, -\frac{1}{1+\Delta}, -1, -1+\Delta, \dots, -\Delta, 0, \Delta, \dots, 1-\Delta, 1, \frac{1}{1+\Delta}, \frac{1}{1+2\Delta}, \dots, \frac{1}{10} \right\}, \quad (4)$$

где  $\Delta = 1/s$ .

Метод контурной сегментации изображений на основе ГВП с параметрами: отношение верхнего порога к нижнему и верхний порог, т. е. процент точек в распределении величин вейвлет-коэффициентов, которые будут включены в контурный препарат, заключается в следующем:

- задаются значения масштаба ГВП  $s = 1, 2, 4, \dots$ ;
- для ГВП с каждым значением масштаба  $s$ :
- вычисляются верхний и нижний пороги с учетом выбранных параметров;
- вычисляются коэффициенты фильтра (4);
- для каждой строки исходного изображения выполняется ГВП с использованием коэффициентов фильтра (4); получается контрастированное изображение  $I_x(x, y)$ , где  $x$  — номер строки,  $y$  — номер столбца изображения, такого же размера, как и исходное;
- для каждого столбца исходного изображения выполняется ГВП с использованием коэффициентов фильтра (4); получается контрастированное изображение  $I_y(x, y)$  такого же размера, как и исходное;
- к контрастированным изображениям  $I_x(x, y)$  и  $I_y(x, y)$  применяется морфологическая обработка контура изображения метода Канни.

Морфологическая обработка контура изображения метода Канни для контрастированных изображений  $I_x(x, y)$  и  $I_y(x, y)$  имеет вид:

- вычисляются значения интенсивности оценки градиента  $R(x, y)$  исходного изображения по формуле  $R(x, y) = \sqrt{(I_x(x, y))^2 + (I_y(x, y))^2}$ ;
- находятся локальные максимумы градиента изображения  $R(x, y)$ ;
- если найденный локальный максимум превышает нижний порог, он записывается в созданный массив слабых контуров;
- если найденный локальный максимум превышает верхний порог, он записывается в созданный массив сильных контуров;
- выполняется операция гистерезиса: к сильным контурам присоединяются только соседние с ними слабые контуры при помощи морфологической операции дилатации.

Параметры предложенного метода контурной сегментации изображений на основе ГВП выбираются из априорной информации о величине минимального обнаруживаемого перепада интенсивности и о размерах объекта на изображении. Если такая информация недоступна, то пороги и количество уровней ГВП для предложенного метода оцениваются эвристически путем настройки.

Экспериментально оценены помехоустойчивость и точность выделения контуров предложенного морфологического метода контурной сегментации изображения в пространстве ГВП.

При оценке помехоустойчивости учитывались три основных вида ошибок определения положения перепадов интенсивности изображения (далее перепадов): пропуск настоящих перепадов, ошибка в определении положения перепада, принятие шумовых выбросов за перепад [5]. В качестве показателя помехоустойчивости метода использовался критерий Прэтта  $\tilde{R}$  [5].

Показателем точности выделения контуров выбран показатель близости между границами тестового идеально сегментированного изображения  $I^{sm}$  и изображения  $I^t$ , сегментированного исследуемым методом обработки [6]:

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I^t(x, y) - I^{sm}(x, y))^2}}{P}, \quad (5)$$

где  $P$  — длина границ выделенных сегментов в пикселях;

$m, n$  — размеры изображения.

Получены графики зависимости значения критерия Прэтта и показателя (5) от отношения сигнал/шум  $q$  по мощности для тестового изображения размера  $256 \times 256$ , представляющего собой черно-белый перепад с наложенным на него аддитивным независимым гауссовским шумом (рис. 5).

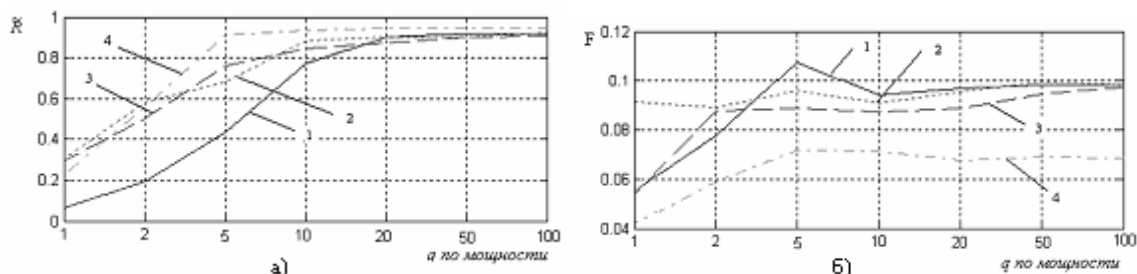


Рис. 5 Зависимости критерия Прэтта (а) и показателя точности выделения контуров (б) от отношения сигнал/шум для  $s_1(1) > s_2(2) > s_3(3)$  для предложенного метода контурной сегментации и метода Канни (4)

Результаты исследований показали, что разработанный на основе ГВП метод контурной сегментации изображений при значениях масштаба  $s \geq 2$  и при значениях отношения сигнал/шум менее 5 по мощности превышает по помехоустойчивости метод Канни в 1,1 ... 1,5 раза. В остальных случаях получена сравнимая с методом Канни помехоустойчивость.

Сравнительная оценка точности выделения контуров предложенным методом с методом Канни показала, что из-за регуляризации интеграла (1) наблюдается ошибка в 1-2 пикселя и ухудшение точности выделения контуров по сравнению с методом Канни до 1,4 раз. По быстродействию оба метода сравнимы. Поэтому можно использовать разработанный метод контурной сегментации изображений на основе ГВП при отношениях сигнал/шум менее 5 по мощности в автоматизированных системах обработки и распознавания изображений, для которых ошибка в 1-2 пикселя допустима.

Показан пример применения предложенного метода контурной сегментации к тестовому изображению (рис. 6).

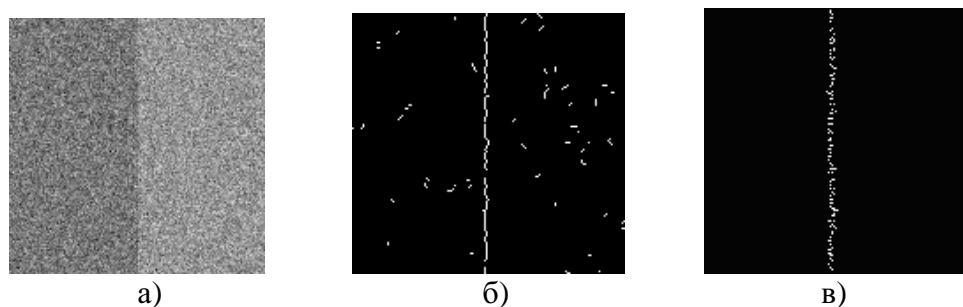


Рис. 6 Результат сегментации тестового изображения перепада интенсивности с аддитивным гауссовским шумом ( $q=2$  по мощности) (а) методом Канни (б) и предложенным методом (в).

Одной из важных характеристик, определяющих качество работы метода контурной сегментации изображений, является зависимость значений критерия Прэтта  $\tilde{R}$  от протяженности перепада интенсивности, например, в строке изображения (рис. 7).

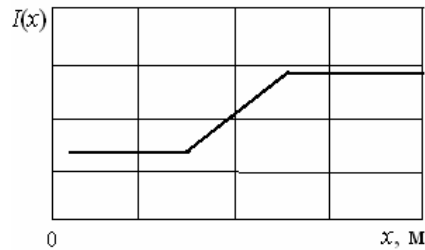


Рис. 7 Значения интенсивности строки изображения, содержащего протяженный перепад интенсивности

Получена сравнительная оценка предложенного метода контурной сегментации изображений и метода Канни на протяженном перепаде интенсивности (рис. 8).

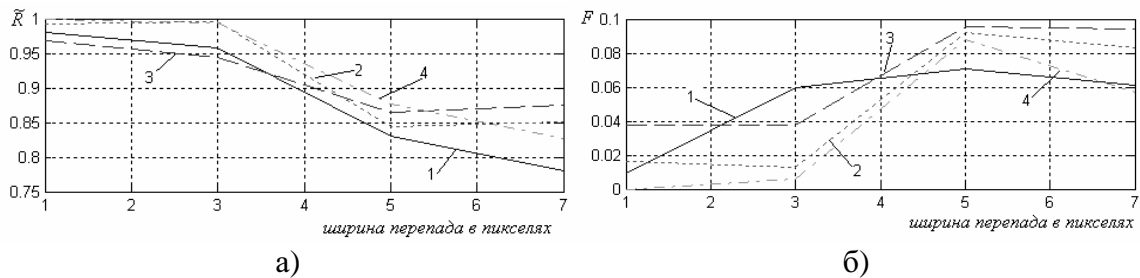


Рис. 8 Зависимости критерия Прэтта  $\tilde{R}$  (а) и показателя точности выделения контуров  $F$  (б) от протяженности перепада,  $q=100$  по мощности, для  $s_1(1) > s_2(2) > s_3(3)$  для предложенного метода контурной сегментации и метода Канни (4)

При протяженности перепада 3 пикселя и менее метод Канни превосходит предложенный метод контурной сегментации изображений по точности выделения контуров до 4 раз, по помехоустойчивости оба метода сравнимы. Если протяженности перепада составляет 4 пикселя и более, оба метода также сравнимы.

**Выводы.** Т. о. комбинирование ГВП с математической морфологией позволило построить метод контурной сегментации изображения, обеспечивающий высокую помехоустойчивость выделения контуров при малых значениях отношения сигнал/шум входного изображения и регулируемую детализацию объектов изображения.

The image noise stability of the Canny method of contour image segmentation with hyperbolic wavelet transform help is increased.

1. Canny J.E. A computational approach to edge detection // IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1986. — № 8. — P. 679 — 698.

2. Полякова М.В., Любченко В.В. Контурная сегментация изображений на основе вейвлет-анализа // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2004. — Вып. 1(21). — С. 121 — 125.

3. Антощук С.Г., Крылов В.Н. Обработка изображений в области гиперболического вейвлет-преобразования // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. журн. — Херсон, 2003. — № 2. — С. 7 — 10.

4. Гельфанд И.М., Шилов Г.Е. Обобщенные функции и действия над ними / Вып. 1.— М.: Физматгиз, 1959. — 470 с.

5. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т. 2. — М.: Мир, 1982. — 790 с.

6. Абакумов В.Г., Крылов В.Н., Антощук С.Г. Повышение эффективности обработки образной информации в автоматизированных системах // Электроника и связь: Темат. вып. “Проблемы электроники”. — 2005. — Ч. 1. — С. 100 — 105.

## R-D ПРОБЛЕМА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Мороз В.В.

Интенсивное развитие цифровых методов обработки информации оказало существенное влияние на все техники передачи и хранения информации. Это объясняется такими характеристиками цифровых систем, как помехозащищенность, возможность исправления ошибок, гибкости при коммутации сообщений, высокой надежности. Одновременно идет постоянное расширение использования изображений (видео) в различных областях науки и техники: медицине, астрономии, бесконтактной дефектоскопии, экспериментальной физике и т.д. Обычное изображение содержит много избыточной информации, которая приводит к экономическим потерям. Поэтому при передаче и хранении изображений предварительно осуществляют ее сжатие. Операция сжатия выполняется с целью уменьшения размера данных, описывающих изображение. Сжатие необходимо для скорейшей передачи информации по каналам связи и экономии памяти запоминающих устройств, т.к. современные объемы данных, описывающих изображения, достигают от нескольких сот килобайт до нескольких десятков гигабайт.

В зависимости от вида извлекаемой избыточности возможны два класса алгоритмов сжатия данных: с частичной потерей информации и без потери информации. Сжатие без потери информации, основанное на извлечении статистической избыточности, позволяет полностью восстановить исходные данные, т.е. реконструированные после сжатия данные будут идентичны данным до сжатия. Но, сжатие без потери информации позволяет достичь небольших степеней сжатия – в 3-5 раз. Для извлечения дополнительных типов избыточности используется психофизическое строение системы зрения человека. Установлено, что в системе зрения человека содержатся элементы гомоморфной обработки информации. А такие характеристики системы зрения, как способность восприятия яркости света и ее пространственно частотный отклик, позволяют извлекать из изображения цветовую и пространственную избыточность.

Сжатие с частичной потерей информации приводит к искажению восстанавливаемого изображения (видео). Предполагается такой уровень искажения, при котором оригинальное и восстановленное изображения неразличимы человеком. В зависимости от области приложения допускается разный уровень искажения. Поэтому важным элементом систем сжатия является контроль уровня искажения.

Классический подход к построению математической модели системы сжатия с потерей информации основывается на последовательном кодировании входного сигнала с использованием декоррелирующего преобразования, квантования и энтропийного кодирования. Типовая система сжатия изображений с подсистемой восстановления приведена на рис.1.

В задачах кодирования реалистических изображений с использованием дискретного вейвлетного преобразования (Discrete Wavelet Transform — DWT) [1] эффективность кодирования понимается как минимизация среднеквадратичной ошибки восстановленного после сжатия изображения для заданного битрейта. Битрейт есть количество бит, приходящееся на один пиксель. Эффективность кодирования изображений неразрывно связана с контролем уровня потерь информации и управлением степенью сжатия. Потери информации в процессе сжатия происходят на этапе квантования вейвлетных коэффициентов  $Q$ . Поэтому определение оптимальных, с точки зрения визуального качества, параметров квантования  $Q$  и энтропийного кодирования  $EC$  для заданного битрейта  $R$  является актуальной задачей. Кодер  $C$  используется для



подготовки контекстного моделирования квантованных вейвлетных коэффициентов и в дальнейшем рассматривается как часть энтропийного кодера.

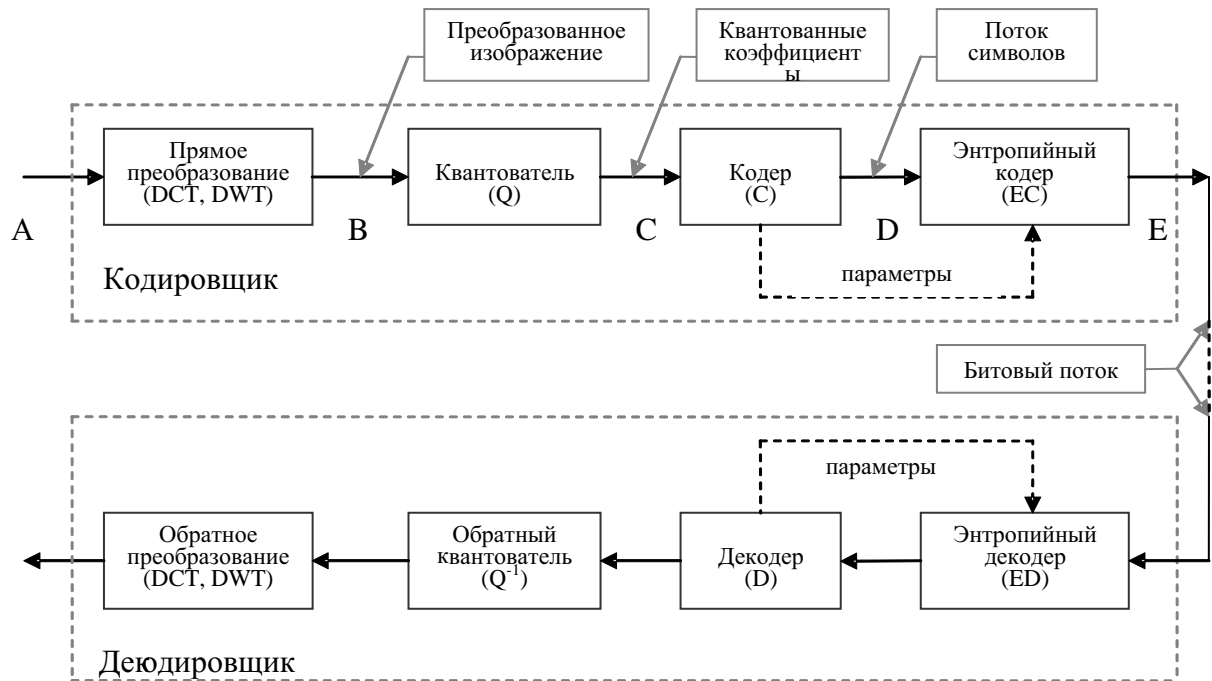


Рис. 1 Схема системы сжатия

Качество системы сжатия может быть измерено с помощью меры искажения  $d_k(x, y)$ . Данная мера определяет уровень искажения сигнала  $y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$  на выходе  $E$  системы сжатия по отношению к сигналу  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  на входе  $A$ .

Наиболее известными алгоритмами решения задачи эффективного кодирования с использованием DWT являются EZW (Embedded Zerotree Wavelet) [2], SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees) [3] и EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) [4], в которых использована упрощенная математическая модель исходного изображения. Предполагается, что изображение является дискретным случайным процессом с независимыми и одинаково распределенными случайными величинами (как правило, с гауссовским распределением вероятностей). Кодирование рассматривается как последовательная обработка нескольких информационных потоков  $k = 1, 2, \dots, K$ , где  $K$  – количество частотных диапазонов, полученных в результате дискретного вейвлетного преобразования. Вейвлетные коэффициенты в каждом частотном диапазоне равномерно квантуются с заданным для каждого диапазона коэффициентом квантования. Энтропийное кодирование, как показано на рис. 2, выполняется за два шага: сначала выполняется контекстное моделирование (исследование окрестности уже квантованных коэффициентов) для выбора вероятностной модели с последующим адаптивным арифметическим кодированием, а затем — оптимальное распределение бит.

Для определения оптимального распределения бит между потоками используются кривые эффективности, которые характеризуют функциональную зависимость битрейта  $R$  от уровня искажения восстановленного изображения  $D$ . Минимальный уровень искажения при ограничении битрейта ищется путем минимизации функции  $J_k = D_k + \lambda R_k$ , где  $D_k$  — уровень искажения  $k$ -го потока,  $R_k$  — битрейт  $k$ -го потока,  $\lambda$  — множитель Лагранжа. Наибольшую сложность такого метода решения задачи

представляет определение кривых эффективности каждого потока, которые зависят от вероятностной модели изображения и используемой техники кодирования. В некоторых работах функциональная зависимость  $R(D)$  строится для нескольких точек, а общая кривая получается в результате аппроксимации этих точек [5].

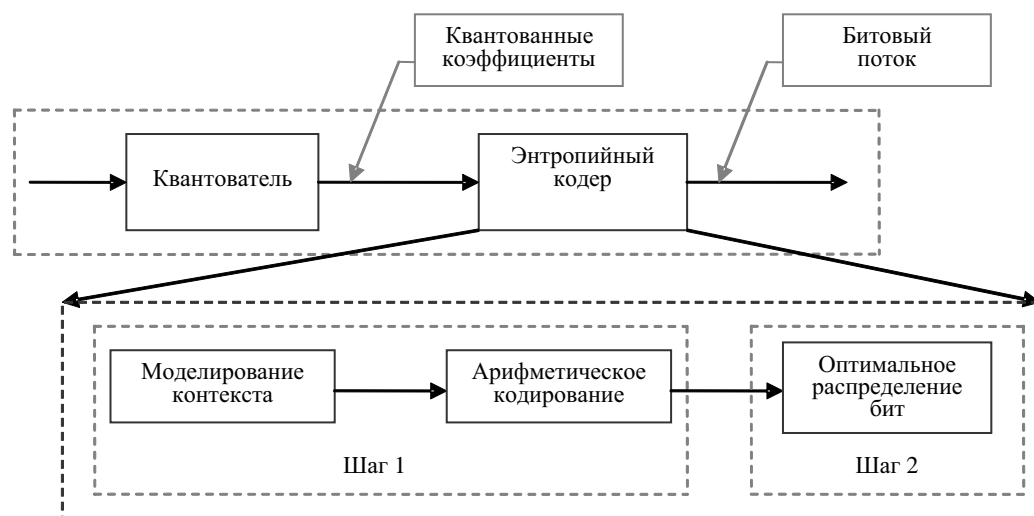


Рис. 2 Схема энтропийного кодера

Задача минимизации уровня искажения при заданном ограничении на битрейт также может быть решена с использованием алгоритма Ллойда-Макса [6], но он основан на обучении, в связи с чем возникает необходимость наличия информации об источнике. Построение квантователя на основе этой информации тоже требует больших вычислительных затрат. Следовательно решение задачи эффективного кодирования с оптимальным распределением бит должно быть направлено на поиск другой техники энтропийного кодирования. Так как кодированию подвергаются квантованные вейвлетные коэффициенты (индексы квантования), то было бы целесообразно совместить квантование, энтропийное кодирование и оптимальное распределение бит. При совместном рассмотрении процессов квантования и энтропийного кодирования, необходимо знать какой вклад приносит квантование и энтропийное кодирование в общую характеристику производительности кодека. Это позволило бы отслеживать квантователи, требующие больших вычислительных ресурсов, но без определения вычислительной сложности квантователя это сделать тяжело.

Поэтому предпочтительней использовать фиксированный равномерный квантователь для всех частотных диапазонов. Тогда энтропийный кодер может адаптироваться ко входной статистике и это не потребует перестройки квантователя. Для сбора статистических данных для энтропийного кодировщика используются индексы квантования, которые являются аппроксимацией вейвлетных коэффициентов. Это приводит к построению намного более простой системы сжатия и в вычислительном отношении, и концептуально.

Для построения оптимального распределения бит предлагается алгоритм кодирования вейвлетных коэффициентов, основанный на адаптивном квантовании с использованием контроля отношения битрейта к уровню искажения входного изображения. Предполагается, что коэффициенты вейвлетного преобразования представляют собой дискретный случайный процесс, распределение вейвлетных коэффициентов представляет собой смесь распределений. Каждому частотному диапазону присвоим свой весовой коэффициент. В пределах одного частотного диапазона вейвлетный коэффициент будет классифицироваться с учетом уже закодированных коэффициентов. Каждому классу соответствует своя модель распределения вероятностей.

На основании этой модели выбираются характеристики квантования и кодирования коэффициентов с учетом оценивания уровня искажения. После кодирования каждого вейвлетного коэффициента вероятностная модель энтропийного кодера, соответствующая данному классу, обновляется.

Пусть дискретная случайная величина  $x$  имеет плотность распределения вероятностей  $f(x)$ . Рассматривается равномерное квантование с размером шага квантования  $\Delta$  и предполагается, что  $\Delta$  настолько мал, что в пределах интервала квантования  $R_i = (x_{i-1}, x_i)$ ,  $x_i = i\Delta$  функция плотности вероятности  $f(x)$  будет практически постоянной. С каждым интервалом квантования  $R_i$  связывается число  $\tilde{x}_i$  — уровень квантования, причем  $i = 0, 1, \dots, N$ , где  $N$  — количество уровней квантования. Входное значение  $x$  отображается в  $\tilde{x}_i$ , если, и только если  $x \in R_i$ . Мера уровня искажения, в общем случае, может быть введена как  $L_\alpha$  норма [1]:

$$D_\alpha = \left( \sum_{i=0}^N \int_{R_i} f(x)(x - \tilde{x}_i)^\alpha dx \right)^{1/\alpha}. \quad (1)$$

Пусть максимальное и минимальное значения  $x$  необязательно конечные величины, и в процессе восстановления при обратном квантовании реконструированное значение  $\tilde{x}_i$  будет находиться точно посередине интервала  $[i\Delta, (i+1) \cdot \Delta)$ , т.е. будет равно  $i\Delta + \Delta/2$ .

Ошибка квантования для этого случая будет:

$$\begin{aligned} (L_\alpha\{x - \tilde{x}\})^\alpha &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_{i\Delta}^{(i+1)\Delta} (x - i\Delta - \Delta/2)^\alpha f(x) dx \approx \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_{i\Delta}^{(i+1)\Delta} (x - i\Delta - \Delta/2)^\alpha f(i\Delta) dx = \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_{i\Delta}^{(i+1)\Delta} (x - i\Delta - \Delta/2)^\alpha f(i\Delta) dx = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{\Delta^{\alpha+1}}{2^\alpha(\alpha+1)} f(i\Delta) = \frac{\Delta^\alpha}{2^\alpha(\alpha+1)}. \end{aligned}$$

Тогда уровень искажения может быть определен как

$$D_\alpha = L_\alpha\{x - \tilde{x}\} = \frac{\Delta}{2(\alpha+1)^{1/\alpha}}. \quad (2)$$

Как видно из (2) уровень искажения является функцией шага квантования. Если используется равномерное квантование для всего изображения, то изменяя шаг квантования, можно изменять качество изображения. При достаточно малых значениях  $\Delta$  с учетом выражения (2) среднеквадратичная ошибка в частотном домене будет  $CKO = \Delta^2 / 12$ . Если преобразование является ортонормированным, то  $CKO$  не будет изменяться в области изображения. Отношение сигнал/шум по мощности можно вычислить как:

$$PSNR \approx 10 \log_{10} \frac{12 \cdot 2^{2B}}{\Delta^2},$$

где:  $B$  — количество бит, приходящееся на один пиксель в исходном изображении.

Таким образом, можно контролировать качество восстанавливаемых изображений, изменяя шаг квантования. С другой стороны, перед началом сжатия можно, исходя из желаемого качества изображения, выбрать соответствующий размер шага квантования  $\Delta$ . В соответствии с определением равномерного квантователя, индексы квантования являются аппроксимацией вещественной прямой, при которой некоторому целому  $i$  ставится в соответствие вещественное число  $i\Delta$ . Так как каждому вейвлетному коэффициенту  $x$  соответствует индекс квантования  $i$ , который является оптимальным с точки зрения отношения битрейта к уровню искажения при ограничении  $R \leq R_0$  то, сводя задачу условной оптимизации к безусловной, получим функционал  $J_\alpha = D_\alpha^\alpha + \lambda R$ . Тогда

для некоторого  $\lambda$  можно получить одно из множества возможных  $i$ , которое будет минимизировать

$$J_{\alpha}(x, i\Delta) = (x - i\Delta)^{\alpha} + \lambda R(i). \quad (3)$$

Битрейт  $R(i)$  можно получить из таблицы вероятностей арифметического кодировщика. Однако необходимо определить множитель Лагранжа  $\lambda$ , который является фиксированным для всех вейвлетных коэффициентов и зависит от заданного битрейта  $R_0$  и данных для кодирования. Следовательно, до начала кодирования их необходимо предварительно оценить.

Для поиска  $\lambda$  возьмем математическое ожидание от функционала (3):

$$J_{\alpha}(\Delta) = M\{J_{\alpha}(x, i\Delta)\} = M\{|x - i\Delta|^{\alpha} + \lambda R(i)\}. \quad (4)$$

Предположим, что вейвлетные коэффициенты  $x$  имеют распределение Лапласа. Тогда оценка кодирования индексов квантования может быть определена как  $R \approx h(x) - \log_2 \Delta$ , где  $h$  – дифференциальная энтропия.

С учетом (2) и данного предположения, выражение (4) примет вид:

$$J_{\alpha}(\Delta) = \frac{\Delta^{\alpha}}{2^{\alpha}(\alpha + 1)} + \lambda(h(x) - \log_2 \Delta). \quad (5)$$

Тогда

$$\min_{R \leq R_0} J_{\alpha}(\Delta) = \min \left\{ \frac{\Delta^{\alpha}}{2^{\alpha}(\alpha + 1)} + \lambda(h(x) - \log_2 \Delta) \right\},$$

а ограничение  $R \leq R_0$  может быть переписано как

$$\lambda(h(x) - \log_2 \Delta) \leq \lambda(h(x) - \log_2 \Delta_0) \Rightarrow \Delta \geq \Delta_0.$$

Дифференцируя правую часть в выражении (5) и приравнявая ее к нулю, получим

$$\lambda = \frac{\alpha \Delta_0^{\alpha}}{2^{\alpha}(\alpha + 1)} \ln 2,$$

или

$$\lambda = \lambda_{\alpha} \cdot \Delta_0^{\alpha}, \quad (6)$$

где:  $\lambda_{\alpha} = \frac{\alpha \ln 2}{2^{\alpha}(\alpha + 1)}$ .

После подстановки (6) в (3) получим

$$J_{\alpha}(x, \tilde{x}) = |x - i\Delta_0|^{\alpha} + \Delta_0^{\alpha} \lambda_{\alpha} R(i)$$

или, после нормализации,

$$J'_{\alpha}(x, i) = \frac{J_{\alpha}(x, i\Delta)}{\Delta_0^{\alpha}} = \left| \frac{x - i\Delta_0}{\Delta_0} \right|^{\alpha} + \lambda_{\alpha} R(i) = |\tilde{x} - i|^{\alpha} + \lambda_{\alpha} R(i). \quad (7)$$

Следовательно, после вычисления  $x = x/\Delta$  можно найти такое  $i$ , которое минимизирует  $J'_{\alpha}(x, i)$ .

В качестве тестовых изображений использовались Lena (размером 512x512 пикселей), Barbara и Goldhill (размером 720x256 пикселей) с глубиной цвета 24 бита. Изображения сначала переводились из цветового пространства RGB в YUV. Затем к ним применялось DWT с использованием фильтра 9/7. Последующее кодирование производилось с использованием предложенного алгоритма.

Как показывают экспериментальные исследования, данный подход позволяет значительно ускорить поиск оптимального индекса квантования и снизить

вычислительные затраты не менее чем в два раза. При этом качество восстанавливаемых после сжатия тестовых изображений не уступает, а для битрейтов ниже 0,6 бит/пиксель и превосходит на 0,1 – 0,3 децибела качество изображений, полученным с помощью верификационной модели кодека JPEG2000.

Исключение составляют классы изображений, содержащих высокочастотные области. В качестве таких тестовых изображений были выбраны Cha1520 (размером 1520x1008 пикселей) и House (размером 512x512 пикселей). Несмотря на высокую производительность кодирования, для таких изображений наблюдался эффект «размывания» высокочастотных областей. Для устранения данного артефакта необходимо производить дополнительный анализ контекста текущего пикселя, но это может привести к повышению вычислительной сложности алгоритма.

Таким образом, предложенный алгоритм эффективного кодирования может быть использован в системах сжатия с целью уменьшения вычислительных затрат. Время кодирования/декодирования кодека, разработанного на базе данного алгоритма, меньше по сравнению с верификационной моделью JPEG2000 Jasper 7.1. Но судить о скорости работы практических реализаций стандарта пока рано, количество таких реализаций на сегодняшний день очень невелико. Имеющиеся plug-in JPEG2000, например в графическом браузере ACDSsee 8.0, не позволяют провести детальный анализ их эффективности. Тем не менее, можно сказать, что доступные реализации на некоторых битрейтах не только уступают по качеству, предложенному алгоритму, но и медленнее его. Так для тестового изображения CHA1520 у кодека, реализующего предложенный алгоритм, время кодирования для степени сжатия 80:1 (0,3 бит/пиксель) ниже на 18%, чем у кодека Jasper 7.1.

Достоинством кодека, реализующего данный алгоритм, является также его совместимость со стандартом сжатия JPEG2000.

The rate-distortion relation is a key problem in systems of images compression. For increase of efficiency of compression systems search of an optimum rate-distortion parity offered. The embedded encoding with change of scanning wavelet coefficients is using for truncation of the least significant bits.

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 464 с.
2. Shapiro J. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients // IEEE Trans. Signal Processing. — 1993 — Vol. 41. — Pp. 3445 — 3462.
3. Said A., Pearlman W. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. — 1996 — Vol. 6. — Pp. 243 — 250.
4. Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT // IEEE Trans. Image Proc. — 2000 — Vol. 9. — Pp. 1158 — 1170.
5. Jin Li, Shawmin Lei. An embedded still image coder with rate-distortion optimization // IEEE Trans. on image processing. — 1999 — Vol. 8, №. 7. — P. 913 — 924.
6. Gersho A., Gray R. M., Vector Quantization and Signal Compression. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1992. — 732 p.
7. Adams M. D. The JPEG-2000 Still Image Compression Standard // ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 N 2412. — 2001.

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681

### ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ И НАПРАВЛЕННОСТИ ВСЕЙ ГРУППЫ НА КОНЕЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Кiryushatova T.G., Grigорова A.A.

**Введение.** В настоящее время вопросы формирования коллективов для эффективного их функционирования являются очень актуальными. Данная статья посвящена вопросам влияния направленности отдельных операторов и всей группы на конечный результат выполнения поставленной задачи. Термин «направленность» употребляется в основном для обозначения позиций и ценностей, которые, сочетаясь, образуют содержание мотивационной сферы. Мотивационная сфера частично определяет восприятие ситуации и личное отношение к ней, которое может порождать как положительную, так и отрицательную оценку ситуации. Такая трактовка позволяет ввести и учесть отрицательную (сдерживающую) и положительную (побудительную) функцию для каждой элементарной операции.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Разработками в данной области занимались: Акофф Р., Эмери Ф., Губинский А.И., Зигель А., Вольф Дж., Марасанов В.В., и многие другие [1-3]. Работы были направлены на решение круга вопросов, связанных с созданием моделей группового поведения в различных системах с учетом психофизических факторов их составляющих. Также велись разработки эргономических основ сложных систем. Направленность в том смысле, как она определена в модели, присуща как отдельной личности, так и рабочей группе. Применительно к элементарной операции направленность выражает восприятие исполнителем (исполнителями) ожидаемой пользы, т. е. направленность определяет, чьи интересы будет обеспечивать исполнитель при выполнении элементарной операции. Ранее были рассмотрены отдельные виды направленности. При выполнении заданной элементарной операции оператор может быть охарактеризован следующими формами направленности: личностная  $S_i$  (на самого себя), коллективистская  $C_i$  (на группу) и деловая  $M_i$  (на задание). Высокая степень личностной направленности означает, что член коллектива функционирует наилучшим образом в том случае, когда велико ожидаемое им личное вознаграждение. Высокая степень коллективистской направленности оператора означает, что он функционирует наилучшим образом в том случае, когда от этого большую пользу получает коллектив. Высокая степень деловой направленности означает, что оператор нацелен, прежде всего, на выполнение элементарной операции и лишь во вторую очередь – на удовлетворение коллективных или личностных потребностей.

**Изложение основного материала исследования.** В основу исследования была положена гипотеза, что оператор крайне редко имеет одностороннюю направленность. В общем случае направленность должна быть представлена вектором, образованном тремя компонентами (иначе «коэффициентами направленности»). Эти коэффициенты не являются независимыми, т.е. сильная ориентация в одном направлении обуславливает слабую ориентацию в других, так что сумма коэффициентов направленности должна равняться единице

$$S_i + C_i + M_i = 1. \quad (1)$$

Для каждого оператора перед началом выполнения задания вычисляются все три коэффициента направленности по следующим формулам:

$$S_i = \frac{K_1}{R_{y, y2}} * R_y, \quad (2)$$

$$C_i = \frac{K_2}{R_{y, y2}} * R_{y1}, \quad (3)$$

$$M_i = \frac{K_3}{R_{y, y2}} * R_{y2}, \quad (4)$$

где  $i$  – номер оператора;

$S_i$  - коэффициент личностной направленности;

$C_i$  - коэффициент коллективистской направленности;

$M_i$  – коэффициент деловой направленности.

Вычисляются три псевдослучайных числа равномерно распределенных в интервале  $(0,1) - R_y, R_{y1}, R_{y2}$ . Эти числа нормализуются таким образом, чтобы они давали в сумме единицу и были взвешены в соответствии с константами

$$R_{y, y2} = K_1 * R_y + K_2 * R_{y1} + K_3 * R_{y2}. \quad (5)$$

Константы направленности  $K_1, K_2, K_3$  задаются для каждой группы испытуемых, и их значения получаются по результатам тестирования [4].

В процессе выполнения операторами задания их коэффициенты направленности изменяются, вычисляются их усредненные значения по следующим формулам:

$$\bar{S} = \frac{\sum S_i}{N}, \quad (6)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum C_i}{N}, \quad (7)$$

$$\bar{M} = \frac{\sum M_i}{N}, \quad (8)$$

где  $N$  – численность всего коллектива.

Компоненты вектора направленности группы определяются из соответствующих компонент направленностей операторов, входящих в группу и характеризуют степень, с которой группа направлена на личность, на коллектив или на задание ( $S_q, C_q, M_q$ ). Поскольку группа представляет собой нечто большее, чем просто сумму или среднее ее частей, полагается, что любое различие в средних значениях компонентов векторов усиливается групповым взаимодействием. Поэтому для вычисления компонентов суммируются значения  $S_i, C_i, M_i$  по всем членам группы, и эти суммы возводятся в квадрат для группы из 2-х человек или в куб для групп из 3-х или более операторов. Затем модифицированные компоненты нормализуются так, чтобы  $S_q + C_q + M_q = 1$ .

$$S_q = \frac{\left( \frac{\sum S_i}{q} \right)^{z_2}}{z_1}, \quad (9)$$

$$C_q = \frac{\left( \frac{\sum C_i}{q} \right)^{z_2}}{z_1}, \quad (10)$$

$$M_q = \frac{\left(\sum M_i\right)^{z_2}}{z_1}, \quad (11)$$

где

$$z_1 = \left(\sum S_i\right)^{z_2} + \left(\sum C_i\right)^{z_2} + \left(\sum M_i\right)^{z_2}, \quad (12)$$

$$z_2 = \begin{cases} 2, & \text{если } V_u < 3 \\ 3, & \text{если } V_u \geq 3 \end{cases}, \quad (13)$$

где  $V_u$  – количество операторов, вошедших в группу;  
 $q$  – номер оператора группы.

Личностная направленность группы означает, что она составлена из лиц, которые в основном ориентированы на себя. Поскольку лица, составляющие группу, различны по своим эгоцентрическим потребностям, нормы и цели коллектива не являются достаточно определенными, вследствие чего сплоченность коллектива низкая.

Коллективистская направленность группы означает, что она составлена из лиц, которые в основном ориентированы на хорошую работу коллектива. Здесь можно ожидать, что сплоченность и спаянность группы будут высокими.

Если группа «направлена» на задание, то его главной целью является выполнение задания, а уже во вторую очередь удовлетворение потребностей группы или индивидуума. Интенсивность различных направленностей определяет ориентацию группы.

**Основные результаты и выводы.** В результате анализа предложенной методики можно сделать вывод, что более эффективно будет работать коллектив, состоящий из операторов с одинаковой направленностью. Спаянность коллектива ухудшается, когда рассеяние индивидуальных коэффициентов направленности возрастает. Разработка данных методик необходима в наше время. Данные методики позволяют максимизировать прибыль предприятия за счет социально-психологических факторов, на которые ранее менее всего обращалось внимание. Позволяют эффективно формировать учебные группы. Новые информационные технологии способствуют более эффективному принятию решений, как в экономике, так и в других областях [4,5]. Поставленные задачи лучше выполняются в коллективе подобранном для совместной и коллективной работы, чем в аналогичном коллективе, но с разносторонностью взглядов и совместных отношений.

The article is devoted to methods of formation of collectives in view of an orientation of the separate members of collective, and also group of the operators. The formulas of account of necessary factors for job of groups of the operators are given. The recommendations for association of the operators in groups are given.

1. Зигель А., Вольф Дж. Модели группового поведения в системе «человек-машина» с учетом психосоциальных и производственных факторов. - М.: Мир, 1973. - 261 с.

2. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. – М.: Советское радио, 1974.- 271 с.

3. Разработка методов математической формализации деятельности коллективов операторов различной численности в условиях помех и дефицита времени: Отчет о НИР / КПИ им. С. Лазо; руководитель работы Марсанов В.В., № ГР 01. 8.80.084062. – Кишинев, 1989.

4. Кирюшатова Т.Г. Количественный подход к подбору сотрудников для коллективной деятельности // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2003. -№ 2(12). – С. 23-25.

5. Трофимов Ю.Л. Инженерная психология. – К.: Либідь, 2002. – 264 с.

6. Уинстон П. Искусственный интеллект. – М.: Наука, 1980. – 520 с.



## ЗАСТОСУВАННЯ КОМІТЕТАМИ ЕКСПЕРТІВ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВОДУ ІЗ ЗВАЖЕНОЮ ІСТИННІСТЮ.

Коршевніук Л.О.

**Вступ.** В задачах прийняття рішень, при моделюванні та формальному описі гуманістичних систем, зокрема економічних та соціальних, у функціонуванні яких приймає участь людина, стикаються з проблемою домінування якісних, погано визначених факторів, які виявляються у невизначеностях, нечітких, неточних, розпливчастих властивостях процесів та явищ. Існуючі детерміновані підходи з використанням точних характеристик об'єктів, явищ та процесів, точних методів моделювання та прийняття рішень і процедур оптимізації не враховують зазначені фактори, тому не можуть бути успішно використані при моделюванні реальних процесів.

Для вирішення зазначеної проблеми користуються технологіями штучного інтелекту. Достатньо популярним є розв'язання практичних задач багатокритеріального оцінювання і вибору за допомогою систем, що базуються на теорії нечітких множин (ТНМ) та нечіткій логіці Л.Заде [1]. Нечітка логіка припускає те, що логіка оперує приблизними поняттями, що робить її подібною до людських міркувань. Істиннісний функціонал в НЛ приймає значення з відрізка  $[0, 1]$ . Доцільно зазначити, що виходячи з публікацій у відкритих джерелах серед неперервнозначних логік у світі немає рівних нечіткій логіці Л.Заде, як за розробленістю, так і за кількістю застосувань.

Крім того, зрозуміло, що для прийняття якісних рішень в реальних задачах слід спиратись на досвід, знання та інтуїцію фахівців-експертів, тому на практиці вдаються до спільного використання підходів штучного інтелекту та методів експертних оцінок [2,3,4].

Серед практичних задач прийняття рішень одними з найактуальніших у різних галузях діяльності людини постають задачі багатокритеріального оцінювання і вибору комітетом експертів. Так, наприклад, в економічних системах такими задачами є задачі розподілу ресурсів, задачі оптимізації «портфелю», задачі вибору рішень з множини альтернативних варіантів, тощо.

У загальному випадку задача багатокритеріального групового експертного оцінювання і вибору формулюється наступним чином. Нехай є множина запропонованих об'єктів  $\mathbf{O} = \{O_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  та комітет осіб, що приймають рішення, (ОПР)  $\mathbf{D} = \{D_t\}$ ,  $t = \overline{1, k}$ . Необхідно з множини об'єктів вибрати ті, що у найкращий спосіб відповідають деякій заданій цілі.

Загальна схема розв'язання таких задач виглядає наступним чином. Для об'єктів  $\mathbf{O}$  комітетом ОПР  $\mathbf{D}$  експертним способом визначається набір важливих критеріїв  $\mathbf{C} = \{C_c\}$ ,  $c = \overline{1, h}$ , за якими буде проводитись оцінювання об'єктів [3]. Визначені критерії  $C_c$ ,  $c = \overline{1, h}$ , за якими ОПР будуть оцінювати проекти, можуть відрізнятися своєю важливістю, та в результаті, мати різну вагу впливу на рішення задачі. Більш того, кожна ОПР може мати свій погляд на ранжирування та розподіл ваг критеріїв, тому доцільно, щоб кожна ОПР  $D_t$  надавала свої індивідуальні вагові коефіцієнти  $W_{ct}$  для кожного критерію  $C_c$ , де  $c = \overline{1, h}$ ,  $t = \overline{1, k}$ . Окрім цього, доцільним постає врахування значимості, досвіду, рівню підготовки, посади, тощо кожної ОПР. Для цього ОПР  $\mathbf{D} = \{D_t\}$  колегіально, чи, як правило, керівником комітету – особою, що є відповідальною за прийняте рішення, завдаються вагові коефіцієнти  $V_t$  для ОПР  $D_t$ ,  $t = \overline{1, k}$ .

Кожному об'єкту  $O_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  кожною ОПР  $D_t$ ,  $t = \overline{1, k}$  за кожним критерієм  $C_c$ ,  $c = \overline{1, h}$  надаються окремі суб'єктивні експертні оцінки  $S_{ict}$ . Значимо, що перевага за одним із критеріїв не залежить від того, які значення приймають оцінки певного об'єкту за іншими критеріями [4,5].

Отже, задача, що розглядається, є задачею багатокритеріального вибору об'єктів комітетом експертів. Для реальних практичних задач зручним та прийнятним є використання підходу зведення задачі багатокритеріального вибору до задачі однокритеріального вибору [4,5], тобто вибір об'єктів буде відбуватись за узагальненою агрегованою оцінкою кожного об'єкту  $O_i$  – ступенем привабливості  $A_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  до загальної цілі.

Для знаходження узагальнених агрегованих оцінок об'єктів з урахуванням невизначеностей, які, як вже зазначалось, дуже характерні для такого класу задач, зручним є використання системи нечіткого логічного виводу (НЛВ) [4,6].

Система НЛВ для одержання узагальнених оцінок об'єктів має  $h$  входів (кількість критеріїв оцінювання), та один вихід – власне узагальнена оцінка об'єкту. Система НЛВ використовується для кожного об'єкту  $O_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  та для кожної ОПР  $D_t$ ,  $t = \overline{1, k}$  окремо, тобто система НЛВ відпрацьовує  $n \cdot k$  циклів. За один цикл на вхід системи НЛВ подаються оцінки  $S_{ict}$  за критеріями  $C_c$  об'єкту  $O_i$  від ОПР  $D_t$ , де  $c = \overline{1, h}$ . На виході система видає узагальнену чітку оцінку  $A_i^D$  об'єкту  $O_i$  від ОПР  $D_t$ .

Потім на основі узагальнених за критеріями оцінок  $A_i^D$  та вагових коефіцієнтів  $V_t$  ОПР, де  $i = \overline{1, n}$ ,  $t = \overline{1, k}$ , здійснюється операція знаходження остаточної агрегованої оцінки кожного об'єкту  $O_i$  – ступенем привабливості  $A_i$ , де  $i = \overline{1, n}$ . Загальнопоширеним методом розрахунку таких агрегованих оцінок є зважена сума:

$$A_i = \frac{\sum_{t=1}^k V_t \cdot A_i^D}{\sum_{t=1}^k V_t} \quad (1)$$

Рішення задачі отримують шляхом вибору об'єктів з найкращими значеннями ступенів привабливості до загальної цілі [4].

Необхідно зазначити, що при практичному застосуванні систем нечіткого логічного виводу для розв'язання розглянутого класу задач, саме у випадках залучення до розв'язку задач групи експертів і фахівців з певної предметної галузі, стикаються з суттєвими проблемами, які інколи навіть унеможливають використання систем НЛВ в реальних задачах.

**Постановка задачі.** Розглянемо основні засади системи НЛВ, необхідні для розуміння подальшого матеріалу. Нечіткий логічний вивід визначає відображення вектора вхідних даних в скалярне вихідне значення за допомогою нечітких правил [4,6]. Система НЛВ, як показано на рис. 1, складається з трьох основних компонентів: фазифікатора, механізму логічного виводу та дефазифікатора.

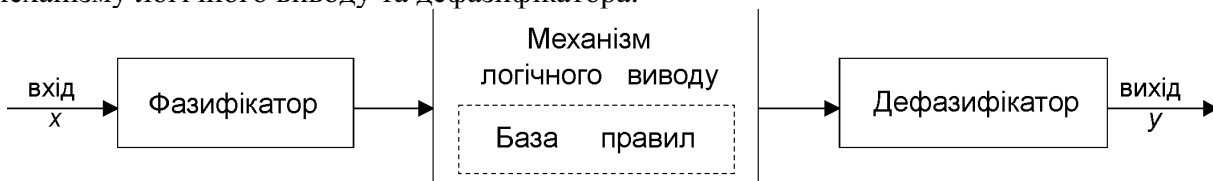


Рис. 1 Загальна схема системи нечіткого логічного виводу

*Фазифікатор* визначає ступінь належності вхідних значень  $x_c$ ,  $c = \overline{1, h}$  до нечітких множин входу – лінгвістичних змінних з відповідної лінгвістичної шкали

$T_{x_c} = \{T_{x_c}^1, T_{x_c}^2, \dots, T_{x_c}^{m_{xc}}\}$ , де  $m_{xc}$  – кількість лінгвістичних змінних у шкалі для  $c$ -того входу, яка, як правило, є рівною для всіх входів. Ця процедура викликана використанням у системі НЛВ лінгвістичних правил, та здійснюється задля визначення ступеню істинності кожної передумови кожного правила.

Ядром механізму логічного виводу є база правил, яка містить лінгвістичні правила. Ці правила можуть бути задані експертним шляхом, чи отримані із числових статистичних даних. Механізм логічного виводу відображає вхідні нечіткі множини  $T_{x_c}^{any}$ ,  $c = \overline{1, h}$  кожного правила у вихідну  $T_y^{any}$  з набору вихідних лінгвістичних змінних  $T_y = \{T_y^1, T_y^2, \dots, T_y^{m_y}\}$ . Відмінною рисою НЛВ є те, що порядок виконання правил не впливає на результат – правила виконуються паралельно. Правила в базі правил  $Rules = \{Rule_j\}$ ,  $j = \overline{1, r}$  містяться у наступному форматі [4,6]:

$$Rule_j = \text{" якщо } x_1 \in T_{x_1}^{any} \text{ і } x_2 \in T_{x_2}^{any} \dots \text{ (2)}$$

$$\dots \text{ і } x_h \in T_{x_h}^{any}, \text{ то } y^j \in T_y^{any} \text{ "}$$

Потім, вихідні нечіткі множини  $y^j$  кожного правила об'єднуються в одну нечітку множину виводу  $\tilde{y}$ .

Дефазифікатор відображає нечітку множину виводу  $\tilde{y}$  у чітке число  $\bar{y}$ , яке і є результатом системи НЛВ для заданих вхідних значень  $x_c$ ,  $c = \overline{1, h}$ . Тобто діапазон вихідних значень дефазифікатор перетворює в одне числове значення зручне для подальшого використання. На практиці користуються наступними поширеними методами дефазифікації [4]: центроїдний, методи максимуму, метод центру максимумів, висотна дефазифікація.

Зазначимо, що при потужних перевагах системи НЛВ мають суттєвий недолік, який полягає у великій трудо- та ресурсномісткості побудови бази правил.

Оскільки кожен член з комітету ОПР може мати своє переконання щодо важливості того чи іншого критерію, то для підвищення якості рішення доцільно для кожної ОПР  $D_i$  при відпрацюванні циклів системи НЛВ використовувати індивідуальні думки ОПР щодо рівню важливості оцінок за критеріями.

Структура правил нечіткого логічного виводу, побудованих в загальному випадку за (2), зумовлює урахування важливості критеріїв в самих правилах, тобто причинно-наслідкові зв'язки між входами та виходом, які сформульовані в тому чи іншому правилі, за своїм змістом та суттю визначають залежність величини виходу від вхідних значень та взаємного відносного рівню важливості вхідних значень. Тому для урахування індивідуальних переваг кожної ОПР  $D_i$  щодо рівню важливості оцінок за критеріями найбільш коректним постає створення та використання індивідуальних баз правил для кожної ОПР  $D_i$  [7].

Однак, цілком зрозуміло, що такий підхід використання індивідуальних баз правил для кожної ОПР в реальних задачах прийняття рішень є дуже дорогим, трудо- та ресурсномістким, що зумовлює його неприйнятність для практичного застосування – в цьому і полягають зазначені вище проблеми практичного використання систем НЛВ в задачах вибору комітетом експертів [7].

Необхідно розробити підхід застосування системи нечіткого логічного виводу придатний для практичного застосування у реальних практичних задачах із залученням комітетів експертів.

**Результати.** Пропонується комітету ОПР використовувати систему НЛВ з єдиною базою правил – систему нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю [8].

Процес нечіткого логічного виводу у найпоширенішій системі НЛВ за Мамдані [4,6] виглядає наступним чином. База правил  $Rules = \{Rule_j\}$ ,  $j = \overline{1, r}$  складається з правил у вигляді (2). На етапі фазифікації визначаються ступені належності вхідних значень  $x_c$ ,  $c = \overline{1, h}$  до нечітких множин входу, тобто визначаються ступені істинності  $\mu_c^j(x_c)$  для кожної передумови кожного правила  $j$ . Далі для кожного правила  $j$  на основі ступенів істинності передумов  $\mu_c^j$  розраховується ступінь його виконання  $\alpha_j$ . Для цього застосовують композицію на основі оператору мінімуму:

$$\alpha_j = \min(\mu_1^j(x_1), \mu_2^j(x_2), \dots, \mu_h^j(x_h)), \quad j = \overline{1, r}. \quad (3)$$

І для кожного правила на основі ступеню виконання  $\alpha_j$ ,  $j = \overline{1, r}$  розраховується результат його виконання – вихідна нечітка множина з усіченою функцією належності  $\check{\mu}^j(y)$ . Визначення усіченої функції належності, тобто операція імплікації, також відбувається за допомогою оператора мінімуму:

$$\check{\mu}^j(y) = \min(\alpha_j, \mu^j(y)), \quad j = \overline{1, r}. \quad (4)$$

Наприкінці механізму логічного виводу вихідні нечіткі множини виконаних правил за допомогою оператора максимуму агрегуються в нечітку множину виводу  $\tilde{y}$ , функція належності якої має наступний вигляд:

$$\mu_{\tilde{y}} = \max(\check{\mu}^1(y), \check{\mu}^2(y), \dots, \check{\mu}^r(y)). \quad (5)$$

Нечіткий логічний вивід Мамдані для системи НЛВ з двома входами та двома виконаними правилами графічно проілюстровано на рис. 2.

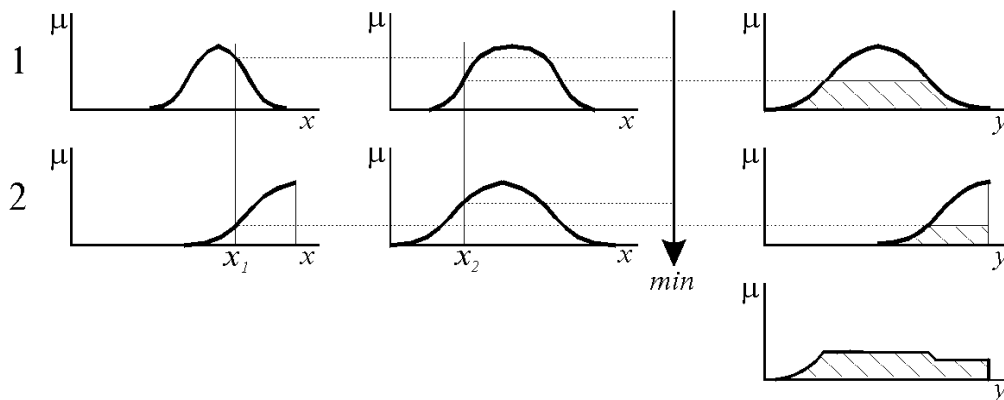


Рис. 2 Ілюстрація нечіткого логічного виводу Мамдані

На останньому етапі приведення до чіткості для знаходження остаточного результату  $\bar{y}$  вдаються до процедури дефазифікації нечіткої множини [4]. Метод дефазифікації обирається в залежності від конкретної задачі. Придатними для запропонованого методу агрегації значень в задачах прийняття рішень постають наведені вище методи дефазифікації: центроїдний, методи максимуму, метод центру максимумів, висотна дефазифікація.

Центроїдний метод (рис. 3) полягає у знаходженні центру ваги (центроїду) нечіткої множини  $\tilde{A}$ , який і обирається за результат  $A$ :

$$A = \frac{\int_{c_1}^{c_n} x f_{\tilde{A}}(x) dx}{\int_{c_1}^{c_n} f_{\tilde{A}}(x) dx}. \quad (6)$$

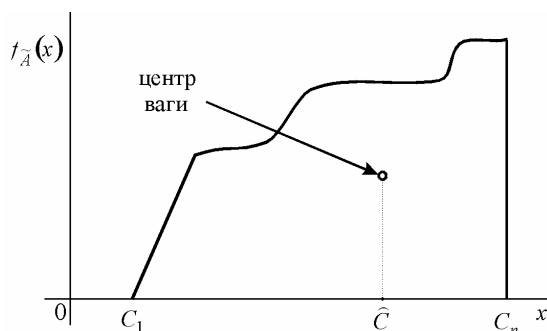


Рис.3 Дефазифікація центроїдним методом

Методи максимуму, які графічно показані на рис. 4, полягають у виборі чіткого результату  $A$  серед тих значень, для яких значення функції належності  $f_{\tilde{A}}(x)$ , тобто ступінь належності є найбільшим. Серед методів максимуму найпоширеніші: метод першого максимуму та метод середнього максимуму.

У методі першого максимуму чітке значення  $A$  знаходиться як найменше значення  $x$ , при якому досягається найбільше значення функції належності  $f_{\tilde{A}}(x)$ :

$$A = \min\left(x \mid \max_{[c_1, c_n]} f_{\tilde{A}}(x)\right), \quad \text{тобто } A = \min_{[a, b]}(x) = a. \quad (7)$$

У методі середнього максимуму чітке значення  $A$  знаходиться відповідно як середнє значення з тих, при яких досягається найбільше значення функції належності  $f_{\tilde{A}}(x)$ . Середній максимум на рис. 3 позначений  $\hat{C}$ .

$$A = \frac{\int_a^b x dx}{\int_a^b dx}. \quad (8)$$

У методі центра максимумів виходом  $A$  є середня точка між центрами областей значень  $x$ , при яких функція належності  $f_{\tilde{A}}(x)$  утворює найвищі «плато». Застосування даного методу графічно зображено на рис. 5.

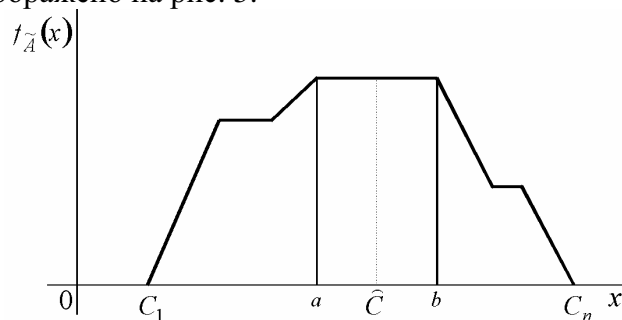


Рис.4 Дефазифікація методами максимумів.

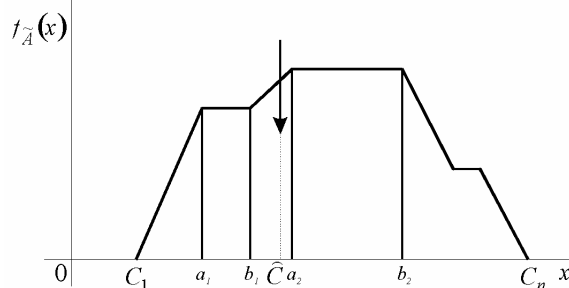


Рис.5 Дефазифікація методом центра максимумів.

Метод висотної дефазифікації полягає у знаходженні центроїду  $\alpha$ -рівня, тобто з нечіткої множини  $\tilde{A}$  до уваги приймаються лише ті значення  $x$ , для яких  $f_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ :

$$A = \frac{\int_{x \in X^\alpha} x f_{\tilde{A}}(x) dx}{\int_{y \in X^\alpha} f_{\tilde{A}}(x) dx}, \quad X^\alpha = \{x \mid f_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (9)$$

При  $\alpha = 0$  з методу висотної дефазифікації (9) виходить центроїдний метод (6).

Система нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю, що запропонована для використання комітетами експертів, полягає в наступному. Опорна база правил, в такій єдиній системі НЛВ створюється з покладанням рівної важливості  $W_c = 1/c$ ,  $c = \overline{1, h}$  для всіх критеріїв  $C = \{C_c\}$ ,  $c = \overline{1, h}$ . При застосуванні запропонованої системи НЛВ для кожної ОПР  $D_t$ ,  $t = \overline{1, k}$  відбувається корегування процесу логічного виводу з урахуванням її індивідуальних значень вагових коефіцієнтів  $W_{ct}$  критеріїв  $C_c$ ,  $c = \overline{1, h}$ . Звичайно вагові коефіцієнти  $W_{ct}$  є нормованими, і в таких випадках доцільно б було їх використовувати як корегувальні множники. Тобто в системі НЛВ за таким методом ступінь істинності кожної передумови  $\mu_c^j$ , що відповідає критерію  $C_c$ , правила  $Rule_j$  для ОПР  $D_t$  помножується на відповідний ваговий коефіцієнт  $W_{ct}$ . Тоді за (3) ступінь виконання  $\alpha_j$  правила  $Rule_j$  при застосуванні системи НЛВ для ОПР  $D_t$  буде визначатись таким чином:

$$\alpha_j = \min(W_{1t} \cdot \mu_1^j(x_1), W_{2t} \cdot \mu_2^j(x_2), \dots, W_{ht} \cdot \mu_h^j(x_h)). \quad (10)$$

Однак, у такому разі значення оцінки за менш важливим критерієм, якому відповідає менше значення вагового коефіцієнту, буде спричиняти більший вплив на значення ступеню виконання  $\beta_j$  правила, тому що у процедурі композиції (4) відповідно до логічного «I» використовується оператор мінімуму [8]. Вочевидь, що такий спосіб зважування ступенів істинності передумов правил для даної проблеми не є коректним.

Впровадження зворотних вагових коефіцієнтів  $(1 - W_{ct})$  у якості корегувальних множників також не призводить до коректного відображення вагових співвідношень між значеннями оцінок за критеріями у розрахунку значень ступенів виконання правил. Оскільки в такій ситуації найбільший вплив також може спричинити оцінка за менш важливим критерієм (при меншому ступеню істинності передумови за цією оцінкою).

Отже, використання єдиної опорної бази правил системи нечіткого логічного виводу може суттєво поліпшити умови практичного застосування СНЛВ в реальних практичних задачах прийняття рішень із залученням комітетів експертів, проте, це потребує розв'язання зазначеної проблеми коректного корегування єдиної бази правил для кожного члену комітету.

Для адекватного урахування різних значень вагових коефіцієнтів векторів ОПР  $D_t$  та забезпечення участі кожної оцінки у формуванні значення ступенів виконання правил та, відповідно, у результаті логічного виводу при використанні єдиної бази правил пропонується для визначення ступеню виконання  $\beta_j$  правила в процедурі композиції ступенів істинності передумов правила (3, 10) замість оператору мінімуму використовувати зважену суму значень оцінок, тобто лінійну комбінацію значень оцінок за всіма критеріями та їх вагових коефіцієнтів.

За таким підходом ступінь виконання  $\beta_j$  правила  $Rule_j$  при застосуванні системи НЛВ для ОПР  $D_t$  буде визначатись наступним чином:

$$\alpha_j = \sum_{c=1}^h W_{ct} \cdot \mu_c^j(x_c). \quad (11)$$

Тобто, для розглянутої задачі багатокритеріального вибору операція композиції для правила  $Rule_j$  в процедурі нечіткого логічного виводу системи НЛВ із зваженою істинністю для об'єкту  $O_i$  та ОПР  $D_i$  формулюється так:

$$\alpha_j = \sum_{c=1}^h W_{ct} \cdot \mu_c^j(S_{ict}). \quad (12)$$

Зазначимо, що запропонована до використання система нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю не є існуючою зваженою системою НЛВ. Ідея зваженої системи НЛВ полягає у тому, що кожному правилу  $Rule_j$  надається своє значення ваги.

Висновки. Запропоноване використання системи нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю забезпечує врахування індивідуальних значень вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання об'єктів для кожної ОПР при застосуванні єдиної бази правил для комітету ОПР, знімає необхідність побудови і використання індивідуальних баз правил для кожної ОПР і робить системи НЛВ практично застосовним засобом в реальних задачах прийняття рішень, а саме в задачах багатокритеріального оцінювання і вибору із залученням комітетів експертів.

Подальший розвиток доцільно проводити у напрямку розробки підходів до спрощення і автоматизації процесу побудови бази правил системи НЛВ як експертним способом, так і з наявних статистичних даних систем, об'єктів, процесів та явищ, що досліджуються.

The usage of fuzzy inference systems in decision making problems with engaging of expert committees is considered. The method proposed is based on using of one rule base in weighted validity FIS. The approach proposed allows to take into consideration the individual weight coefficients of estimation criteria for each decision-maker. Also approach removes the necessity of creating and using of personal rule bases for each decision-maker and makes FIS the practical usable tool in real decision making problems.

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets // Information and Control. 8(1965), pp.338-353.
2. Орлов А.И. / Математические заметки. 1981. Т.30. №4. с.561-568.
3. Коршевнюк Л.О., Коршевнюк Д.О., Мінін М.Ю. Патент 71851 А України, МПК G 06 F 17/60, N 7/06. Спосіб одержання якісних експертних оцінок при моделюванні економічних, соціальних, біологічних систем. – № 20031213217; Заявл. 31.12.2003; Опубл. 15.12.2004, Бюл. “Промислова власність” № 12.
4. Коршевнюк Л.А., Бидюк П.И. Решение задачи распределения инвестиций на основе нечеткого логического вывода // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2003. – №2. – с.34-42.
5. Коршевнюк Л.А., Бидюк П.И. Решение задачи распределения инвестиций между альтернативными проектами // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. – Випуск 17. – Київ, 2002. – с.26-33.
6. Mamdani E.H. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Transactions on Computers, 1977, v. 26, No. 12, pp. 1182-1191.
7. Коршевнюк Л.О., Мінін М.Ю., Бидюк П.І. Підхід групового застосування системи нечіткого логічного виводу // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем: Тези доповідей учасників II міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2004. – с.66-67.
8. Коршевнюк Л.О., Мінін М.Ю. Система нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю // Единое информационное пространство ‘2004: Сборник докладов II-й Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: ИПК ИнКомЦентра УГХТУ, 2004. – с. 114-117.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ УРОВНЯМИ  
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПРИОРИТЕТОВ

Пономаренко Л.А., Меликов А.З., Нагиев Ф.Н.

**Введение**

Приоритеты, определяющие процедуры принятия в буфер (очередь) разнотипных заявок, зачастую называются пространственными приоритетами (*Space Priorities, SP*), а приоритеты, задающие правила выбора типа заявки из очереди (буфера), получили название временных (*Time Priorities, TP*). В классических схемах приоритетного обслуживания в системах с очередями, как правило, предполагается, что заявки определенного типа обладают (по сравнению с заявками другого типа) одновременно высокими (или низкими) приоритетами обоих видов.

Вместе с тем, интерес представляют модели обслуживания, в которых заявки одного типа являются чувствительными к возможным потерям из-за переполненности буфера и одновременно не предъявляют жестких требований к потерям, в то время как заявки другого типа, наоборот, не предъявляют жестких требований к потерям, а являются очень чувствительными к возможным задержкам в очереди. Иными словами, целесообразно исследовать модели, в которых заявки одного типа имеют высокие *SP* и низкие *TP*, а заявки другого типа, наоборот, имеют низкие *SP* и высокие *TP*. Модели такого типа назовем моделями обслуживания с различными уровнями пространственных и временных приоритетов (можно также использовать термин модели обслуживания с множественными приоритетами).

Подобные модели достаточно точно описывают работу узлов сетей коммутации пакетов, в которых пакеты трафика реального времени (например, пакеты речевой информации) имеют высокие *TP* и низкие *SP* по сравнению с пакетами трафика нереального времени (например, пакетами данных), имеющими более высокие *SP* и низкие *TP* по сравнению с пакетами реального времени.

Несмотря на то, что указанные модели представляют большой теоретический и практический интерес, они в доступной литературе не достаточно исследованы. Лишь в последние годы в работах [1-3] исследованы такие модели. При этом в работах [1, 2] используется метод имитационного моделирования, а в работе [3] предлагается аналитический метод для нахождения характеристик системы (вероятностей потерь разнотипных заявок и средних времен их ожидания в очереди). Отметим, что в работе [3] для ожидания заявок с различными требованиями *TP* используются различные буфера и внутри каждого буфера *SP* реализуются на основе стратегии вытеснения.

В настоящей работе также исследуется модель с различными уровнями *TP* и *SP*. Однако, данная модель отличается от [3] двумя моментами. Во-первых, здесь рассматривается модель с общим буфером для ожидания разнотипных заявок. Во-вторых, для нахождения характеристик модели здесь предлагается численный метод, основанный на принципах теории фазового укрупнения [4]. Использование данного подхода позволяет разработать простые вычислительные процедуры для нахождения искомых характеристик. Ранее данный подход был успешно применен для модели систем со специализированными каналами обслуживания и при наличии лишь пространственных приоритетов различного вида [5-7].

**1. Описание модели и расчет ее характеристик**

Буферное пространство размера  $B$  и канал передачи используются совместно заявками двух типов, при этом заявки первого типа представляют трафик нереального времени, заявки второго типа – трафик реального времени. Используется обычное



предположение о пуассоновском характере входящих трафиков, т.е. предполагается, что процесс поступления заявок  $i$ -го типа подчиняется закону Пуассона с параметром  $\lambda_i, i=1,2$ .

Из-за сложности рассматриваемой модели и с целью получения достаточно обозримых результатов здесь предполагается, что для обоих трафиков время обслуживания распределено показательно со средним  $\mu^{-1}$ . Считается, что заявка любого типа освобождает свое место в буфере в момент выбора ее для обслуживания.

Множественные приоритеты определяются следующим образом. Поскольку трафик первого типа является более чувствительным к возможным потерям пакетов из-за переполненности общего буфера, чем трафик второго типа, то они (т.е. заявки первого типа) имеют высокие пространственные приоритеты. Эти приоритеты осуществляются с помощью стратегии доступа с вытеснением, т.е. поступившая заявка первого типа теряется лишь тогда, когда буфер полностью заполнен и число текущих заявок данного типа в буфере не меньше, чем заданное число  $c, 1 \leq c \leq B$ . Иными словами, поступившая заявка первого типа вытесняет из полностью заполненного буфера заявки второго типа, если текущее число заявок первого типа меньше, чем  $c$ ; в противном случае, т.е. когда в полностью заполненном буфере число заявок первого типа не меньше чем  $c$ , поступившая заявка первого типа теряется. Заявки второго типа теряются тогда, когда буфер полностью заполнен. Параметр  $c$  назовем пороговым параметром для заявок первого типа.

**Замечание 1.** При  $c = B$  рассматриваемые  $SP$  приводят к схеме приоритетизации, исследованной в [3], т.е. введение порогового значения  $c$  придает рассматриваемым здесь  $SP$  элемент адаптивности.

Поскольку трафик второго типа является более чувствительным к возможным задержкам в очереди, чем трафик первого типа, то заявки второго типа имеют высокие относительные временные приоритеты, т.е. заявки первого типа принимаются для обслуживания лишь тогда, когда в момент освобождения канала в буфере отсутствуют заявки второго типа.

Функционирование буфера описывается двумерной цепью Маркова (а более точно – двумерным процессом рождения и гибели) с состояниями типа  $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$ , где  $n_i$  указывает число заявок  $i$ -го типа в очереди,  $i = 1,2$ . Фазовое пространство состояний (ФПС) буфера задается так:

$$E := \{ \mathbf{n} : n_1 = \overline{0, B}, n_1 + n_2 \leq B \} \quad (1)$$

Согласно определению введенных множественных приоритетов интенсивности переходов между состояниями  $\mathbf{n}, \mathbf{n}' \in E$  определяются следующим образом:

$$q(\mathbf{n}, \mathbf{n}') = \begin{cases} \lambda_i, & \text{если } n_1 + n_2 < B, \mathbf{n} = \mathbf{n}' + \mathbf{e}_i, \\ \lambda_1, & \text{если } n_1 + n_2 = B, n_1 < c, n_2 > 0, \mathbf{n} = \mathbf{n}' + \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2, \\ \mu, & \text{если } n_2 = 0, \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_1 \text{ или } n_2 > 0, \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_2, \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{e}_1 = (1,0), \mathbf{e}_2 = (0,1)$ .

Граф модели показан на рис. 1.

Стационарную вероятность состояния  $\mathbf{n} \in E$  обозначим через  $p(\mathbf{n})$ . Тогда, согласно известной теореме PASTA [8] стационарные вероятности потери заявок  $i$ -го типа (*Call Loss Probability, CLP<sub>i</sub>(B,c)*),  $i=1,2$  определяются так:

$$CLP_i(B, c) = \sum_{\mathbf{n} \in E_i} p(\mathbf{n}) \quad (3)$$

Здесь  $E_i$  – множество блокирующих состояний из ФПС (1) для трафика  $i$ -го типа,  $i = 1,2$ . При этом под множеством блокирующих состояний для трафика  $i$ -го типа понимается множество тех состояний из ФПС  $E$ , в которых поступление заявки данного типа означает его потерю безотносительно того, поступает ли в этот момент заявка данного типа или нет.

$\lambda_2$

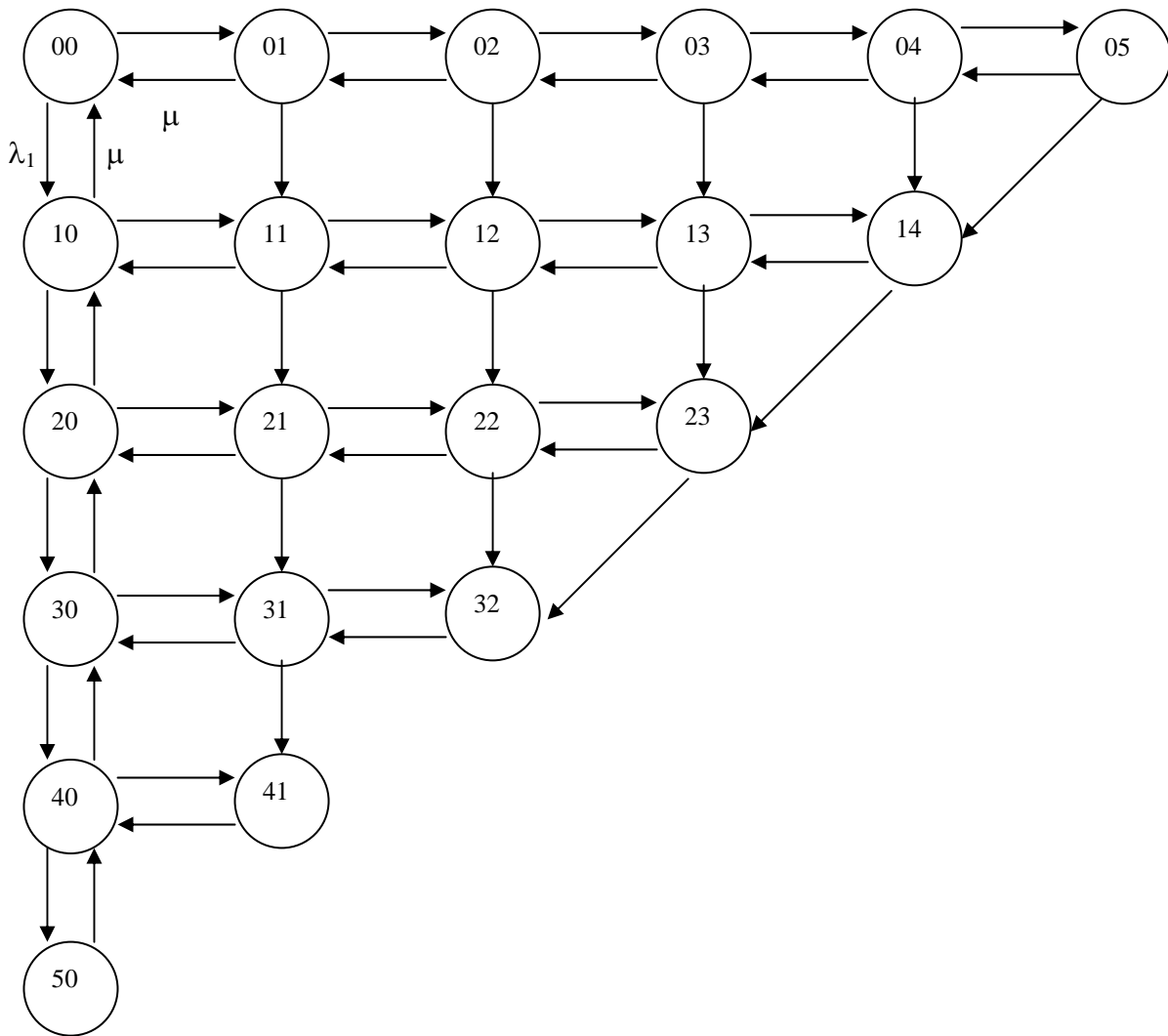


Рис. 1 Граф модели при  $B = 5, c = 2$ .

Формально указанные выше множества определяются так:

$$E_1 = \{\mathbf{n} \in E_2 : n_1 \geq c\};$$

$E_2 = \{\mathbf{n} \in E : n_1 + n_2 = B\}$  – множество диагональных состояний.

Отсюда с учетом (3) получаем, что

$$CLP_1(B, c) < CLP_2(B, c) \quad \forall c \in [1, B].$$

Среднее время задержки в очереди заявок  $i$ -го типа (*Call Transfer Delay,  $CTD_i(B, c)$* ) определяется с помощью формулы Литтла для систем обслуживания с конечной очередью:

$$CTD_i(B, c) := Q_i(B, c) / \lambda_i (1 - CLP_i(B, c)), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

Здесь  $Q_i(B, c)$  обозначает среднее число заявок  $i$ -го типа в очереди,  $i = 1, 2$ . Эти величины определяются так:

$$Q_i(B, c) := \sum_{k=1}^B k \sum_{\mathbf{n} \in E_k} p(\mathbf{n}), \quad (5)$$

где  $E_k^i = \{\mathbf{n} \in E : n_i = k\}$ ,  $i = 1, 2$ .

Следовательно, искомые характеристики модели (3)-(5) определяются через стационарное распределение  $p(\mathbf{n})$ ,  $\mathbf{n} \in E$  исходной цепи Маркова. С использованием известного критерия Колмогорова для двумерных цепей Маркова [9] можно показать, что для стационарного распределения данной модели не существует мультипликативное решение. Этот факт существенно осложняет проблемы расчета характеристик модели (3)-(5), особенно при больших размерах буфера. Для преодоления этих трудностей предлагается использовать приближенный метод расчета указанных характеристик.

Поскольку предложенный подход достаточно подробно описан в литературе (см., например, [5-7] и библиографию при них), то здесь приводится лишь его краткое изложение применительно к данной модели.

Отметим, что предложенный подход имеет высокую точность и является особенно полезным для расчета стационарного распределения двумерных процессов размножения и гибели, которые являются непрерывными хотя бы по одной компоненте. Напомним, что двумерный процесс размножения и гибели является непрерывным, скажем по первой компоненте, если существуют положительные двусторонние вероятности переходов между любыми двумя возможными состояниями типа  $(i, j)$  и  $(i+1, j)$ .

Из соотношений (2) легко видно, что изучаемый двумерный процесс рождения и гибели с ФПС (1) является непрерывным лишь по второй компоненте (см. также рис. 1).

Теперь перейдем к краткому изложению предложенного подхода расчета стационарного распределения изучаемой двумерной цепи Маркова.

Рассматривается следующее разбиение ФПС  $E$ :

$$E = \bigcup_{k=0}^B E_k, E_k \cap E_{k'} = \emptyset, k \neq k', \quad (6)$$

где  $E_k := E_k^I$  (см.(5)).

Далее классы состояний  $E_k$  объединяются в отдельные укрупненные состояния  $\langle k \rangle$  и вводится функция укрупнения на исходном ФПС  $E$ :

$$U(n) = \langle k \rangle, n \in E_k, k = \overline{0, B} \quad (7)$$

Функция укрупнения (7) определяет укрупненную цепь Маркова с ФПС

$$E := \{ \langle k \rangle : k = \overline{0, B} \}.$$

Стационарное распределение исходной модели определяется так:

$$p(n_1, n_2) \approx \rho_{n_1}(n_2) \pi(\langle n_1 \rangle) \quad (8)$$

где  $\rho_{n_1}(n_2), (n_1, n_2) \in E_{n_1}$  и  $\pi(\langle n_1 \rangle), \langle n_1 \rangle \in E$  являются стационарными распределениями внутри класса  $E_{n_1}$  и укрупненной модели, соответственно.

Стационарное распределение внутри класса  $E_i$  с учетом (2) определяется как распределение одномерного процесса размножения и гибели:

$$\rho_i(k) = \nu_2^k (1 - \nu_2) / (1 - \nu_2^{B+1-i}), i = \overline{0, B}, k = \overline{0, B-i}, \quad (9)$$

где  $\nu_2 := \lambda_2 / \mu$  (для краткости изложения здесь приводятся формулы лишь для случая  $\nu_2 \neq 1$ ).

Далее на основе (2) и (9) определяется стационарное распределение укрупненной модели:

$$\pi(k) = \begin{cases} \nu_1^k \left( \prod_{i=1}^k \rho_i(0) \right)^{-1} \pi(\langle 0 \rangle), & \text{если } k = \overline{1, c}, \\ \nu_1^k \left( \prod_{i=1}^k \rho_i(0) \right)^{-1} \left( \prod_{j=B-k+1}^{B-c} (1 - L(\nu_2, j)) \right) \pi(\langle 0 \rangle), & \text{если } k = \overline{c+1, B}, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\pi(\langle 0 \rangle) = \left( \sum_{k=0}^c \nu_1^k \left( \prod_{i=1}^k \rho_i(0) \right)^{-1} + \sum_{k=c+1}^B \nu_1^k \left( \prod_{i=1}^k \rho_i(0) \right)^{-1} \prod_{j=B-k+1}^{B-c} (1 - L(\nu_2, j)) \right)^{-1}, \quad (11)$$

$$\nu_1 = \lambda_1 / \mu, L(\nu, k) = \nu^k (1 - \nu) / (1 - \nu^{k+1}).$$

Тогда, после определенных математических преобразований получим следующие формулы для вычисления искомых характеристик модели:

$$CLP_1(B, c) = \sum_{k=0}^{B-c} L(v_2, k) \pi(< B - k >) \quad (12)$$

$$CLP_2(B, c) = \sum_{k=0}^B L(v_2, k) \pi(< B - k >) \quad (13)$$

$$Q_1(B, c) = \sum_{k=1}^B k \pi(< k >) \quad (14)$$

$$Q_2(B, c) = \sum_{k=1}^B k \sum_{i=0}^{B-k} \pi(< i >) \rho_i(k) \quad (15)$$

Далее, с помощью (12)-(15) вычисляются характеристики (4).

Из формул (9)-(15) видно, что расчет характеристики данной системы обслуживания со сложной схемой приоритетизации сводится к простым вычислительным процедурам. Особенность этих процедур состоит в том, что они подразумевают использование табулированных величин типа  $L(v, k)$  (см. также формулы 9).

### 3. Численные эксперименты по расчету модели

Некоторые результаты численных экспериментов, проведенных с помощью разработанных выше расчетных формул, показаны на рис. 2-13. Во всех экспериментах для простоты принято, что  $\mu := 1$ .

Целью их выполнения является изучение поведения характеристик модели в зависимости от изменения ее параметров (нагрузочных и структурных), а также от порогового параметра для заявок первого типа. Для сравнительного анализа в графиках также показано поведение соответствующих характеристик беспriorитетной модели. Эти характеристики обозначены аналогично приоритетной модели, но только без индексов.

Зависимости характеристик модели от порогового параметра  $c$  показаны на рис. 2-4. Как и следовало ожидать, с ростом параметра  $c$  шансы для принятия в буфер заявок первого типа растут, и, таким образом, вероятность их потери уменьшается, а одновременно с этим увеличивается вероятность потери пакетов второго типа. При этом скорости их изменения существенным образом зависят от значений параметров модели  $v_1$ ,  $v_2$  и  $B$  (см. рис. 2).

Число заявок первого типа ( $Q_1$ ) с увеличением параметра  $c$  также растет вследствие того, что при этом увеличиваются их шансы попасть в буфер, и одновременно в результате вытеснения из буфера уменьшается число заявок второго типа ( $Q_2$ ) в буфере (см. рис. 3). Несколько неожиданным оказалось поведение функции  $CTD_1$  от параметра  $c$  (рис. 4), т.е. с ростом данного параметра  $CTD_1$  уменьшается. Это объясняется тем, что при указанных исходных данных с ростом параметра  $c$  скорость уменьшения функции  $CLP_1$  во много раз превосходит скорость увеличения функции  $Q_1$  (см. формулы (4)), а  $CTD_2$  при тех же данных является почти постоянной.

Зависимости характеристик модели от размера буфера ( $B$ ) показаны на рис. 5-7. Характер этих зависимостей во всех диапазонах изменения исходных данных моделей полностью совпадают с теоретическими ожиданиями, т.е. функции  $CLP_1$  и  $CLP_2$  являются убывающими, а функции  $Q_k$  и  $CTD_k$ ,  $k = 1, 2$ , наоборот, возрастают относительно аргумента  $B$ .

Интерес представляет также изучение зависимости поведения характеристик модели от нагрузки трафиков нереального ( $\lambda_1$ ) и реального ( $\lambda_2$ ) времени. Соответствующие трафики показаны на рис. 8-9 и 10-12. Как и следовало ожидать, с ростом нагрузки трафика любого типа все характеристики модели имеют тенденции к возрастанию, при этом скорости их изменения отличаются друг от друга, и существенным образом зависят от исходных данных модели.

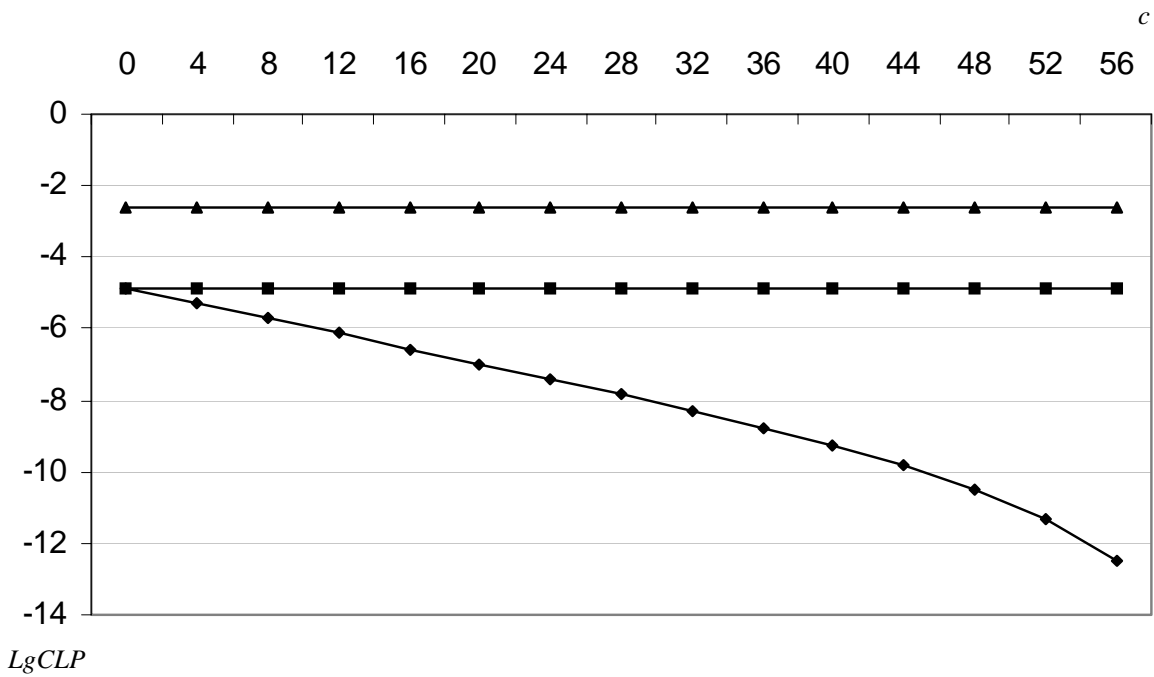


Рис. 2 Зависимость вероятностей потерь разнотипных заявок от параметра  $c$  при  $B=60; \lambda_1=0,1; \lambda_2=0,85;$   
 ▲ -  $CLP$ ; ■ -  $CLP_2$ ; ◆ -  $CLP_1$

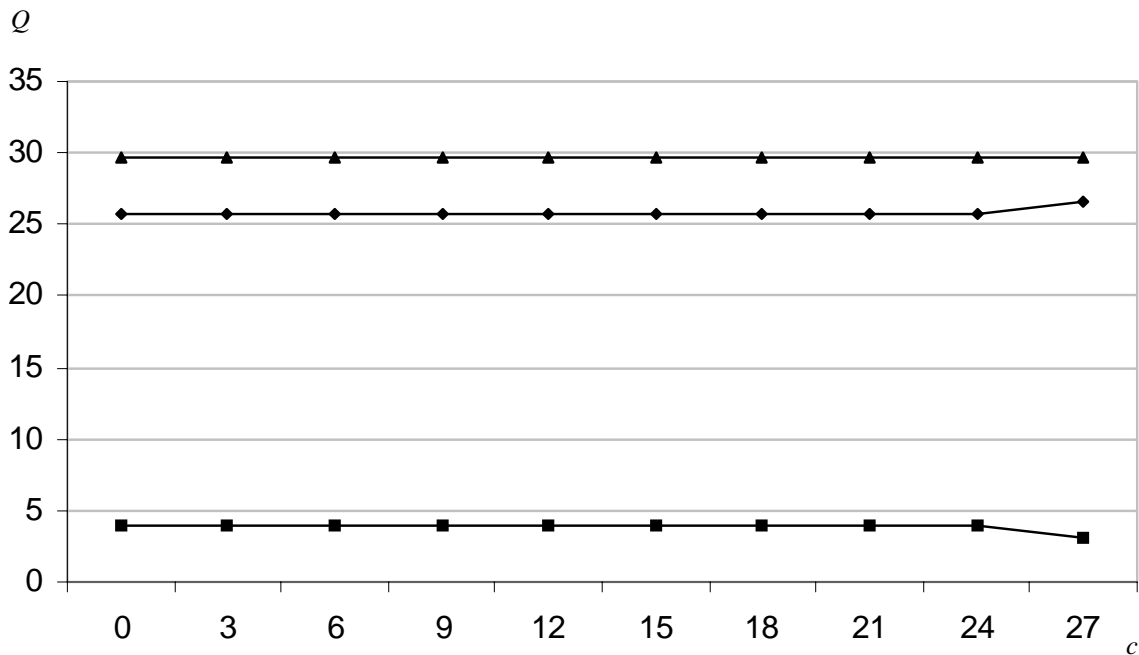


Рис. 3 Зависимость средних длин очередей заявок от параметра  $c$  при  $B=30; \lambda_1=0,01; \lambda_2=5;$   
 ▲ -  $Q$ ; ■ -  $Q_2$ ; ◆ -  $Q_1$

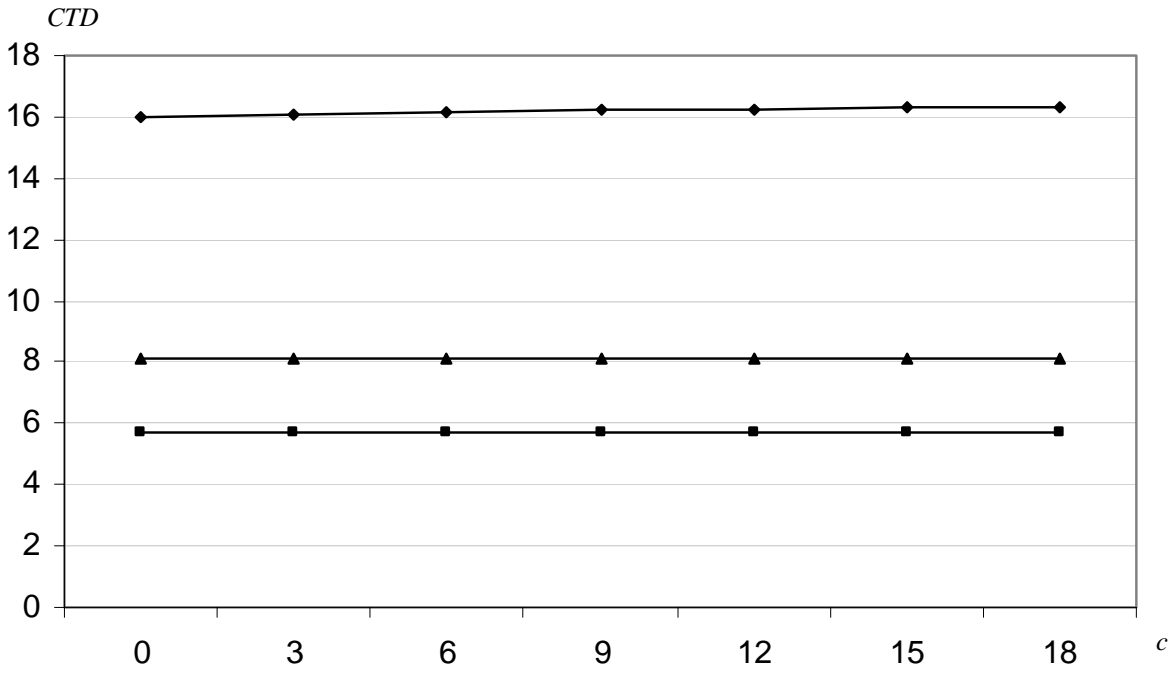


Рис. 4 Зависимость среднего времени ожидания разнотипных заявок от параметра  $c$  при  $B=20$ ;  $\lambda_1=0,1$ ;  $\lambda_2=0,85$ ;  
 ▲ – CTD; ■ CTD 2; ◆ – CTD 1

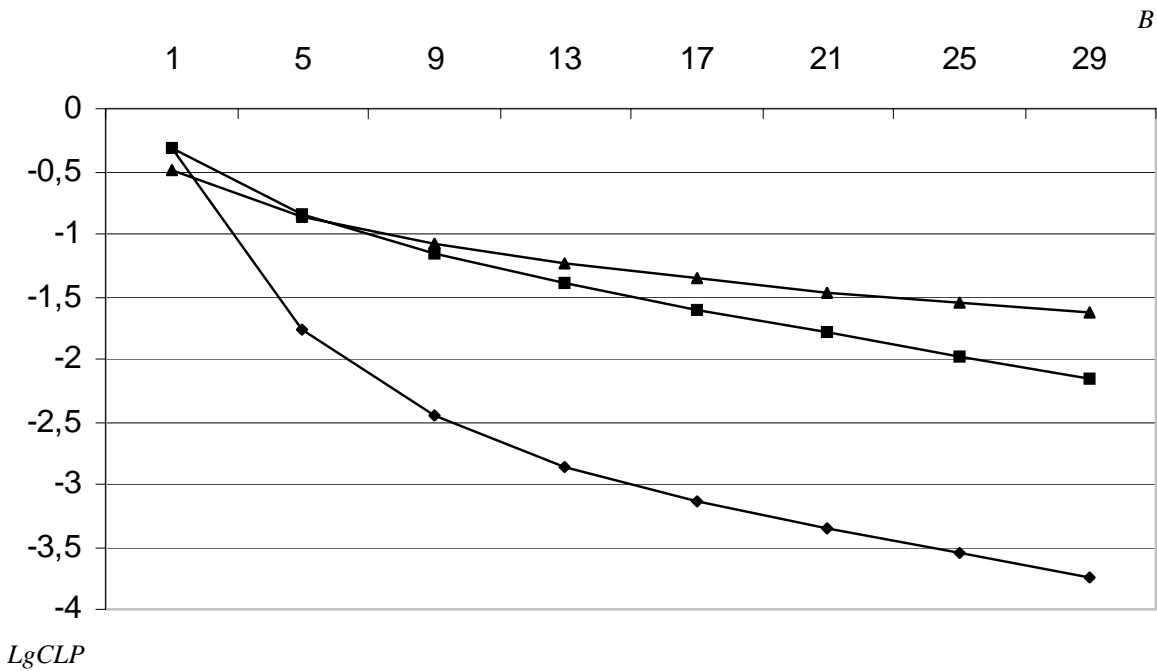


Рис. 5 Зависимость вероятностей потерь разнотипных заявок от параметра  $B$  при  $c=[B/2]$ ;  $\lambda_1=0,08$ ;  $\lambda_2=0,9$ ;  
 ▲ – CLP; ■ – CLP 2; ◆ – CLP 1

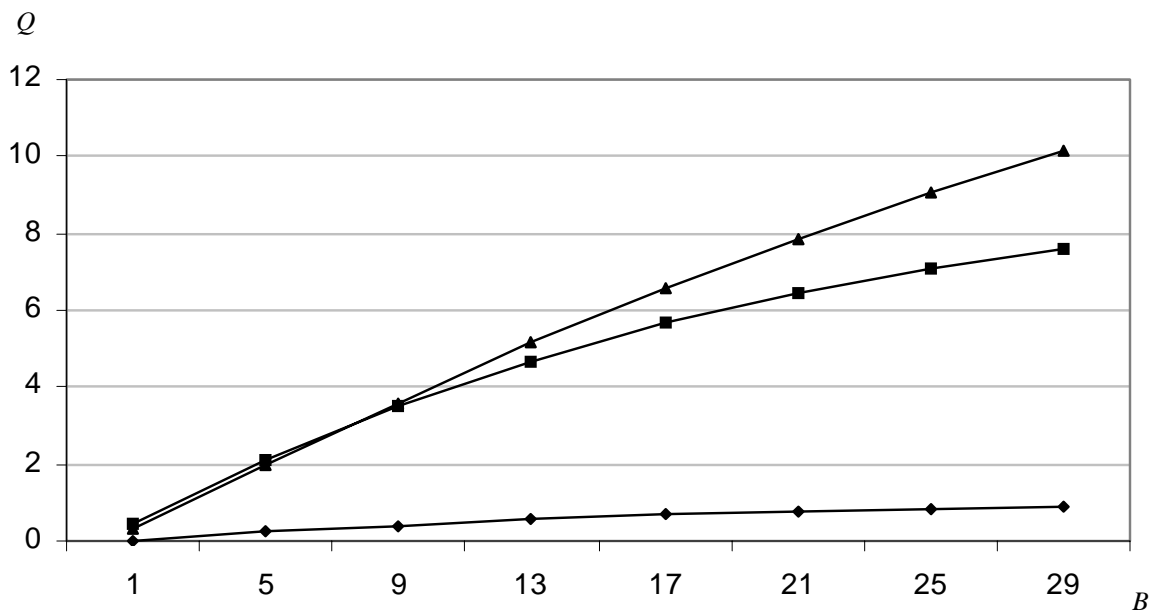


Рис. 6 Зависимость средних длин очередей заявок от параметра B при  $c=[B/2]$ ;  $\lambda_1=0,05$ ;  $\lambda_2=0,9$ ;  
 ▲ – Q; ■ – Q2; ◆ – Q1

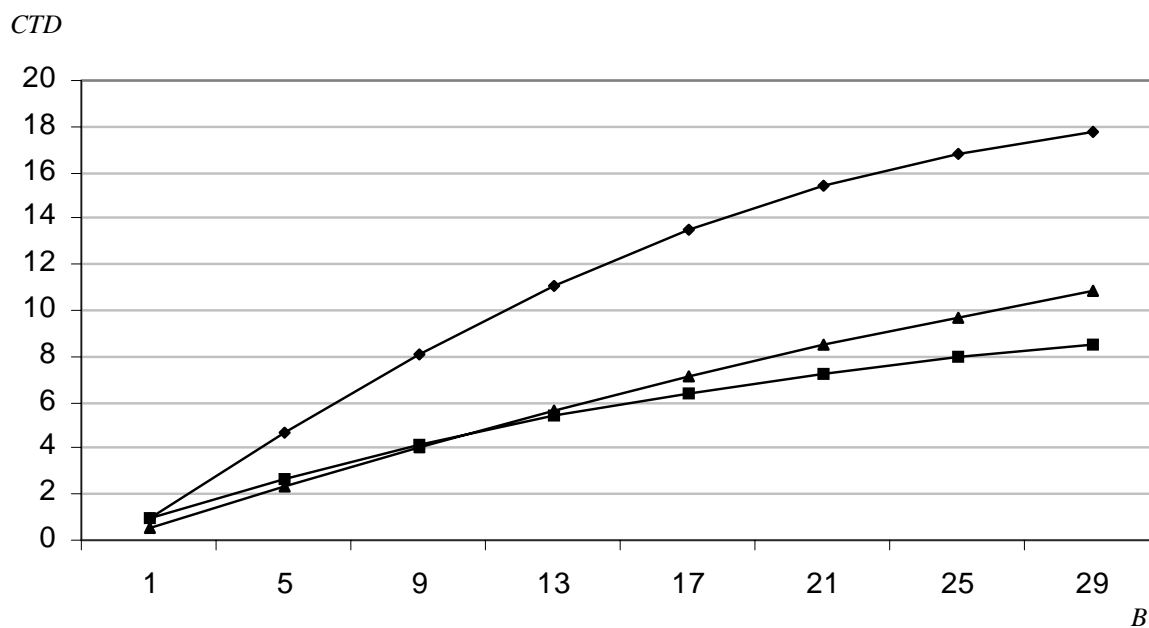


Рис. 7 Зависимость среднего времени ожидания разнотипных заявок от параметра B при  $c=[B/2]$ ;  $\lambda_1=0,05$ ;  $\lambda_2=0,9$ ;  
 ▲ – CTD; ■ CTD 2; ◆ – CTD 1

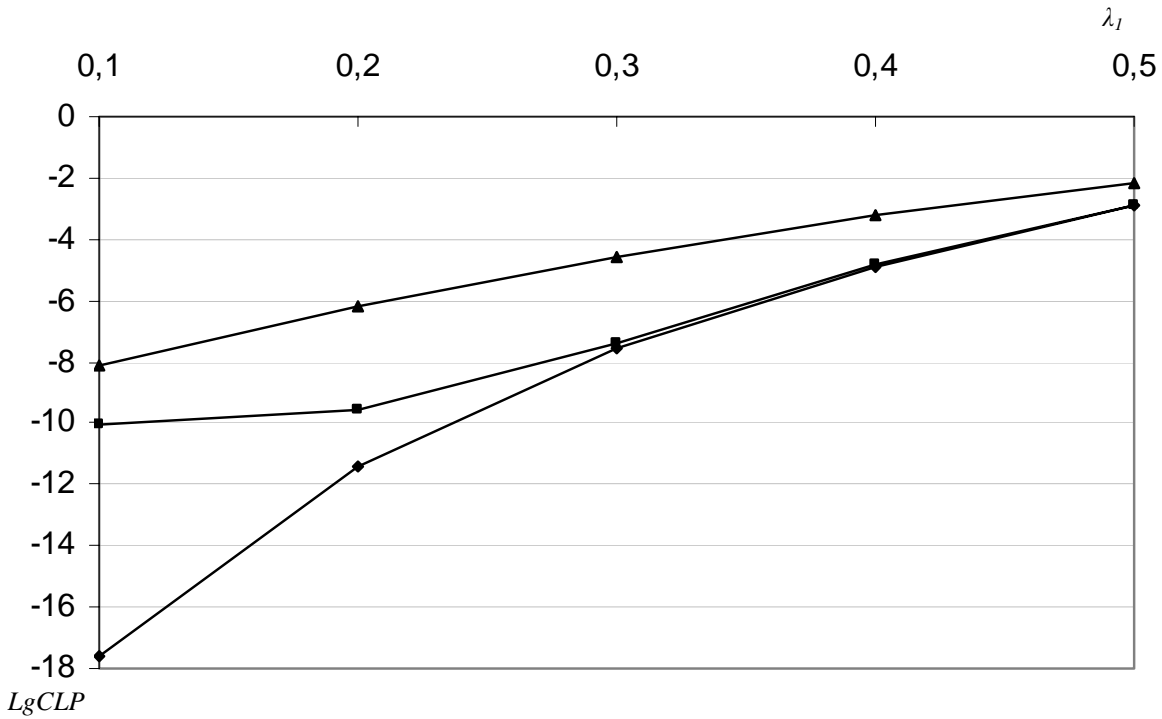


Рис. 8 Зависимость вероятностей потерь разнотипных заявок от параметра  $\lambda_1$  при  $B=25$ ;  $c=20$ ;  $\lambda_2=0,4$ ;  
 ▲ – CLP; ■ – CLP 2; ◆ – CLP 1

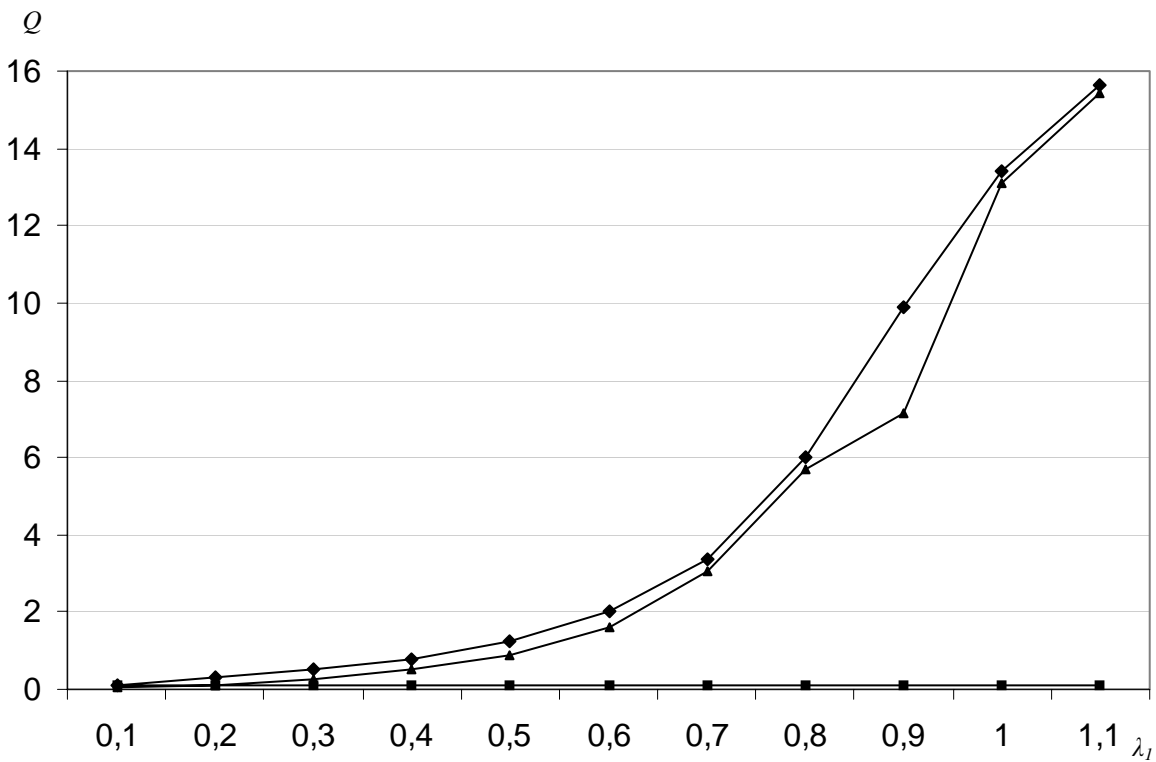


Рис. 9 Зависимость средних длин очередей заявок от параметра  $\lambda_1$  при  $B=20$ ;  $c=10$ ;  $\lambda_2=0,1$ ;  
 ▲ – Q; ■ – Q2; ◆ – Q1



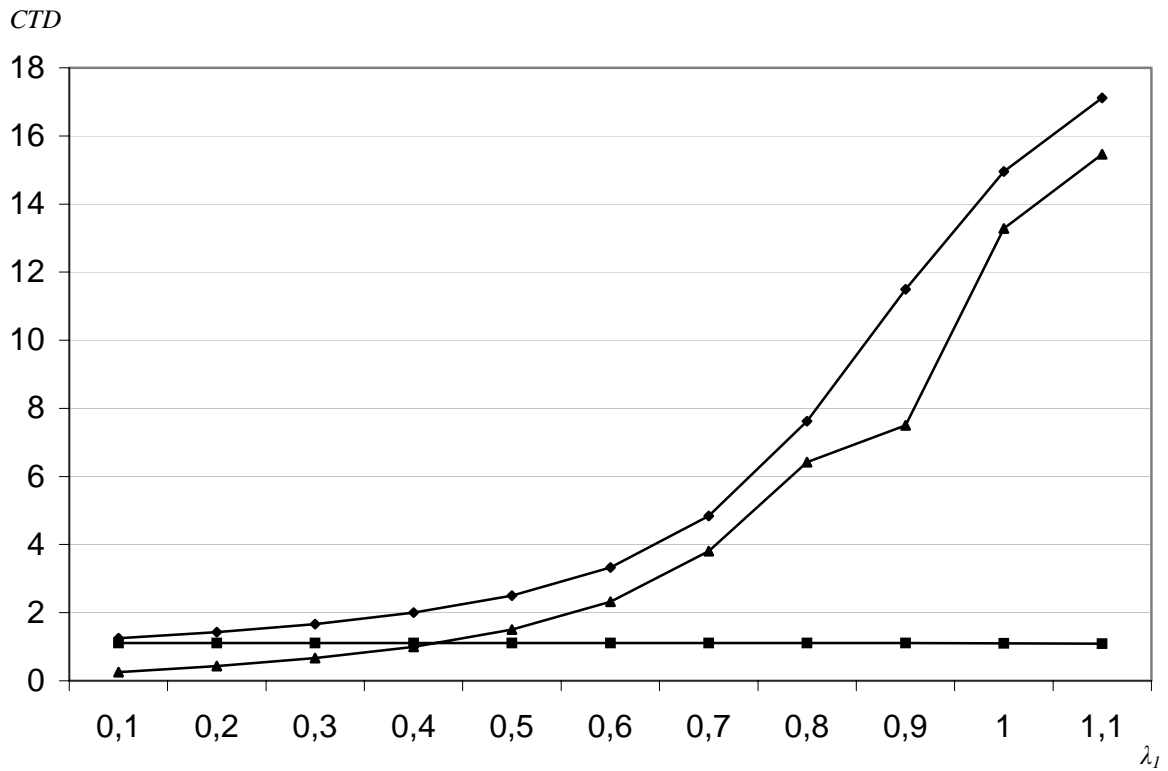


Рис. 10 Зависимость среднего времени ожидания разнотипных заявок от параметра  $\lambda_1$  при  $B=20$ ;  $c=10$ ;  $\lambda_2=0,1$ ;  
 ▲ – CTD; ■ CTD 2; ◆ – CTD 1

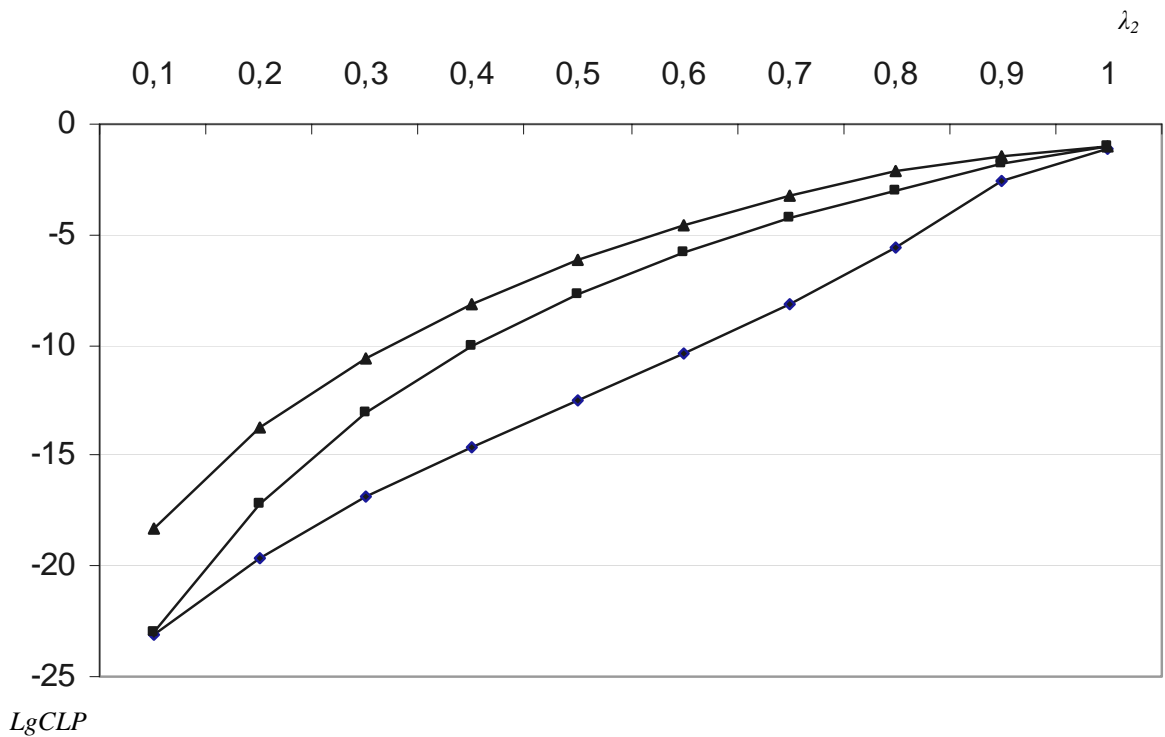


Рис. 11 Зависимость вероятностей потерь разнотипных заявок от параметра  $\lambda_2$  при  $B=15$ ;  $c=7$ ;  $\lambda_1=0,2$ ;  
 ▲ – CLP; ■ – CLP 2; ◆ – CLP 1

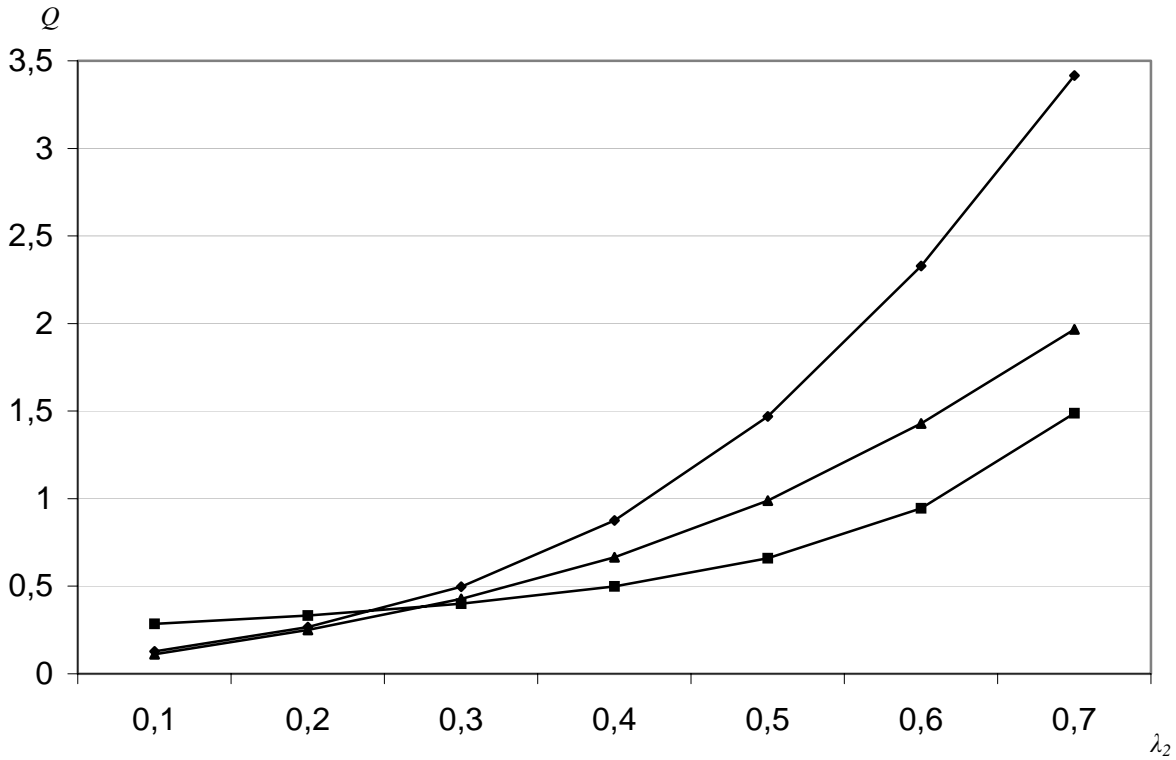


Рис. 12 Зависимость средних длин очередей заявок от параметра  $\lambda_2$  при  $B=15$ ;  $c=7$ ;  $\lambda_1=0,2$ ;  
 ▲ – Q; ■ – Q2; ◆ – Q1

CTD

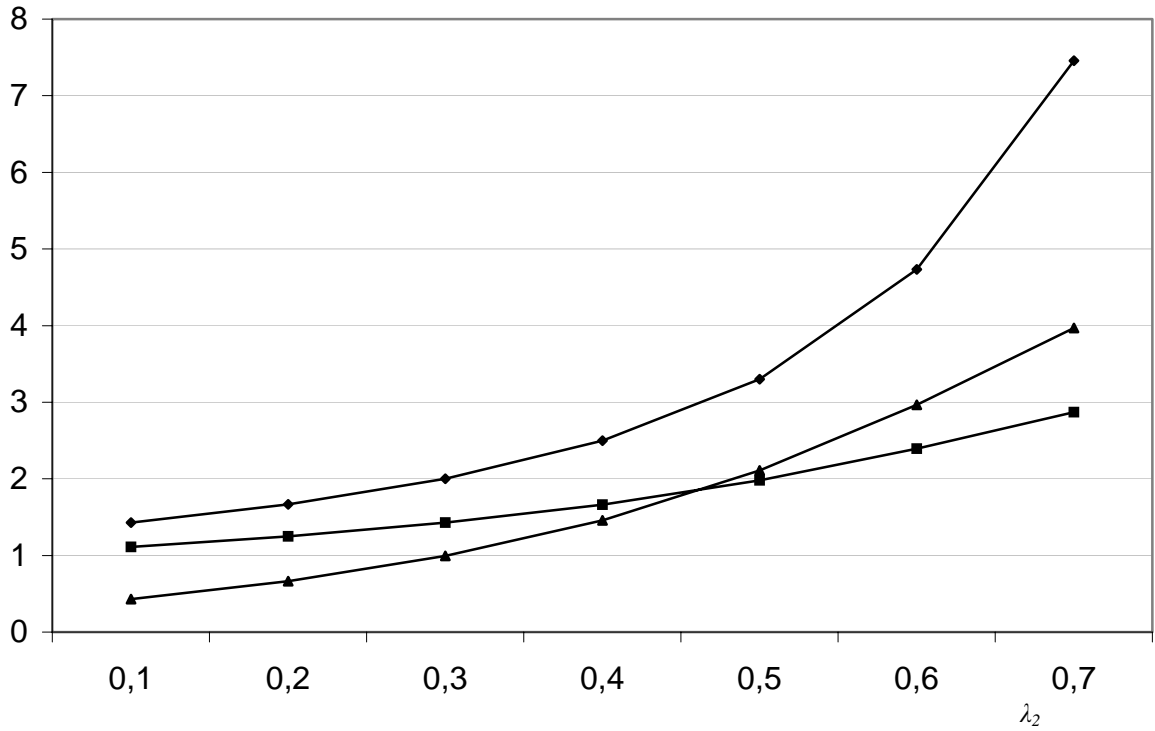


Рис. 13 Зависимость среднего времени ожидания разнотипных заявок от параметра  $\lambda_2$  при  $B=15$ ;  $c=7$ ;  $\lambda_1=0,2$ ;  
 ▲ – CTD; ■ CTD 2; ◆ – CTD 1

Отметим, что представление в графиках на рис. 2-13 также поведения характеристик беспriorитетной модели позволяют производить сравнительный анализ изучаемых характеристик, и, таким образом, принимать решения относительно целесообразности введения множественных приоритетов. Из представленных графиков видно, что последняя проблема (т.е. принятие решения относительно выбора схемы приоритетизации) не является тривиальной и представляет собой многокритериальную проблему (здесь эти проблемы не рассматриваются).

#### Заключение

Предложенный в данной работе подход предлагает достаточно простые алгоритмы расчета характеристик модели обслуживания со сложной схемой приоритетизации разнотипных трафиков, представляющих различные требования к возможным потерям и задержкам в очереди. Разработанные алгоритмы могут быть использованы и для выбора оптимальных (в заданном смысле) параметров модели с целью достижения искомых значений исследуемых характеристик. Эти задачи представляют собой предмет специальных исследований.

Numerical method to calculate the characteristics of single channel queuing system with priorities of different level is proposed. Here real time calls have low space priorities and high time priorities while non-real time calls have high space priorities and low time priorities. Results of computational experiments are given.

1. Chao H.J., Peckan I.H. Queue management with multiple delay and loss priorities for ATM switches // Proc. ICC'94. – 1994. – P.1184 – 1189.
2. Shan Zhi C., Liemin Y. A new priority control of ATM output buffer // Telecommunication Systems. – 1995. – № 4. – P. 61 – 69.
3. Lee Y., Choi B.D. Queueing system with multiple delay and loss priorities for ATM networks // Information Systems. – 2001. – № 138. – P. 7 – 29.
4. Королюк В.С. Стохастические модели систем. – К.: Наук. думка, 1989. – 208 с.
5. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Нагиев Ф.Н. Подход фазового укрупнения для оптимизации стратегий доступа с вытеснением в сетях коммутации пакетов // Кибернетика и системный анализ. – 2004. – № 2. – С.107 – 115.
6. Пономаренко Л.А., Меликов А.З., Фаттахова М.И. Стратегия вытеснения с виртуальным порогом для доступа в буфер узла интегральной сети // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 4. – С. 106 – 115.
7. Пономаренко Л.А., Меликов А.З., Фаттахова М.И. Численные методы исследования многопоточковых систем обслуживания с виртуальным разделением буфера // Кибернетика и системный анализ. – 2004. – № 6. – С. 168 – 172.
8. Wolff R.W. Poisson arrivals see time averages // Oper. Res. – 1992. – **30**, № 2. – P. 223 – 231.
9. Kelly F.P. Reversibility and stochastic networks. – London.: John Wiley & Sons, 1979. – 230 p.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ПІДСИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ  
РІШЕНЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ РОБОТИ ДИФУЗІЙНОГО  
ВІДДІЛЕННЯ

Сідлецький В.М., Ельперін І.В., Ладанюк А.П.

Ефективність роботи дифузійного відділення визначається якісними показниками дифузійного соку та втратами цукру в процесі сокодобування. Якщо розглядати втрати цукру то вони складаються з втрат цукру з жомом та неврахованих втрат.

Значення показників якості залежать від великої кількості параметрів (якість сировини, якість стружки, величина відбору соку, температурні режими, час попереднього ошпарювання стружки, час знецукрення, вплив розвитку мікроорганізмів та інші), які можуть змінюватись у припустимих межах і тісно пов'язані один з одним. Так як значна кількість цих параметрів є слабо формалізованими і зв'язаними, то управління якістю роботи дифузійним відділенням доцільно проводити з використанням підсистеми підтримки прийняття рішень. При цьому актуальним є визначення алгоритму для ідентифікації стану параметрів та визначення характеру їх змін.

Якість роботи станції  $E$  складається з втрат цукру на стадії дифузії  $E_1$  та якість дифузійного соку  $E_2$ . В свою чергу втрати цукру на дифузії  $E_1$  складаються з втрати цукру з жомом  $E_{11}$  та неврахованих втрат  $E_{12}$ . Тому можна вважати, що якість роботи дифузійного відділення характеризується елементом множини  $E$  [1]:

$$E \subseteq E_{11} \times E_{12} \times E_2 \tag{1}$$

Виходячи з даних, наведених у табл. 1 [2], для оцінки втрат цукру в жомі необхідно врахувати вміст сухих речовин в жомі  $C_{жс}$ , вміст цукру в жомі  $X_{жс}$ , кількість жому до маси буряка  $F_{жс}$  :

$$E_{11} = f_{E_{11}}(C_{жс}, X_{жс}, F_{жс}) \tag{2}$$

Таблиця 1

Втрати цукру на стадії дифузії при різних величинах вмісту сухих речовин і цукру в жомі

Вміст сухих речовин у жомі, %	Вміст цукру в жомі, %	Кількість жомі, % до маси буряка	Втрати цукру, % до буряка	Вміст сухих речовин у жомі, %	Вміст цукру в жомі, %	Кількість жомі, % до маси буряка	Втрати цукру, % до маси буряка
8	0,4	55,0	0,22	16	0,4	26,2	0,10
	0,8	59,1	0,47		0,8	27,1	0,22
	1,2	64,0	0,77		1,2	28,1	0,34
10	0,4	43,1	0,17	18	0,4	23,1	0,09
	0,8	45,6	0,36		0,8	23,9	0,19
	1,2	48,5	0,58		1,2	24,6	0,30
12	0,4	35,5	0,14	20	0,4	20,7	0,08
	0,8	37,1	0,30		0,8	21,3	0,17
	1,2	39,0	0,47		1,2	21,9	0,26
14	0,4	30,1	0,12	22	0,4	18,8	0,08
	0,8	31,3	0,25		0,8	19,3	0,15
	1,2	32,6	0,39		1,2	19,7	0,24

Для зниження втрат цукру в жомі [1,2,3] використовують операції  $d_{11}$ , які входять в масив  $D_{11}$  і враховують змінювання параметрів: відбір дифузійного соку  $F_2$ , якість стружки  $W$ , часу дифузії  $H_2$  ошпарювання  $H_1$ , та температуру  $T_2$ :

$$D_{11} = f_{D_{11}}(F_2, W, H_1, H_2, T_2) \quad (3)$$

Час ошпарювання  $H_1$  та час дифузії  $H_2$  залежить від рівня продукту в апараті (відповідно  $L_1$  та  $L_2$ ) та частоти обертання транспортуючих органів (відповідно  $V_1$  та  $V_2$ ) [2,7]:

$$H_1 = f_{H_1}(L_1, V_1) \quad (4)$$

$$H_2 = f_{H_2}(L_2, V_2) \quad (5)$$

Величину неврахованих втрат цукру можна визначити непрямим методом за значенням рН в дифузійному апараті  $P$  та за результатами аналізу на вміст молочної кислоти  $A$ :

$$E_{12} = f_{E_{12}}(P, A) \quad (6)$$

Вибір операції  $d_{12}$  із множини  $D_{12}$ , що дозволяють зменшити невраховані втрати цукру, будуть включати зміну параметрів  $pH$  живильної води  $P$ , часу дифузії  $H_2$  та температури  $T$  [1,2]:

$$D_{12} = f_{D_{12}}(P, H_2, T) \quad (7)$$

Зниження неврахованих втрат за рахунок введення 40% розчину формаліну та обробки буряка вапном є операціями дискретними і в даному випадку не враховувались.

Якість дифузійного соку  $E_2$  характеризується вмістом сухих речовин  $C_c$ , чистотою  $D$ , величиною рН  $P_c$  та цукристістю  $\zeta$ :

$$E_2 = f_{E_2}(C_c, D, P_c, \zeta) \quad (8)$$

Якість дифузійного соку  $E_2$  контролюється: якістю стружки, температурою часом дифузії, якістю живильної води  $N$ . Зміна цих показників відповідає діям  $d_2$ , що входять до множини  $D_2$  [1,2]:

$$D_2 = f_{D_2}(W, H_2, T, N) \quad (9)$$

Як видно із (3), (7), (9), для керування якісними показниками роботи дифузійного відділення використовують цілеспрямовані дії, які можуть впливати одночасно на зміну кожного показника (рис 1). Тому при визначенні управляючих дій,  $d^{11}$ ,  $d^{12}$ ,  $d^2$  що входять до множин  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_2$  відповідно, для зміни одного показника якості необхідно врахувати можливість зміни інших показників, що в загальному має вигляд:

$$D = \bigcup \left| D_{11} \cap D_{12} \cap D_2 \right| \quad (10)$$

Для прийняття рішення при виборі дії необхідно враховувати стан кожного параметра в зв'язку з:

- можливістю змінювати кожний показник якості декількома параметрами;
- неможливості в подальшій зміні вибраного параметра;
- неефективністю зміни параметра в існуючому стані.

Тому для прийняття рішення, з приводу доцільності зміни вибраного параметру, для кожного виділений масив термів, який можна представити у вигляді

$$X = \{x^1, x^2, \dots, x^m\} \quad (11)$$

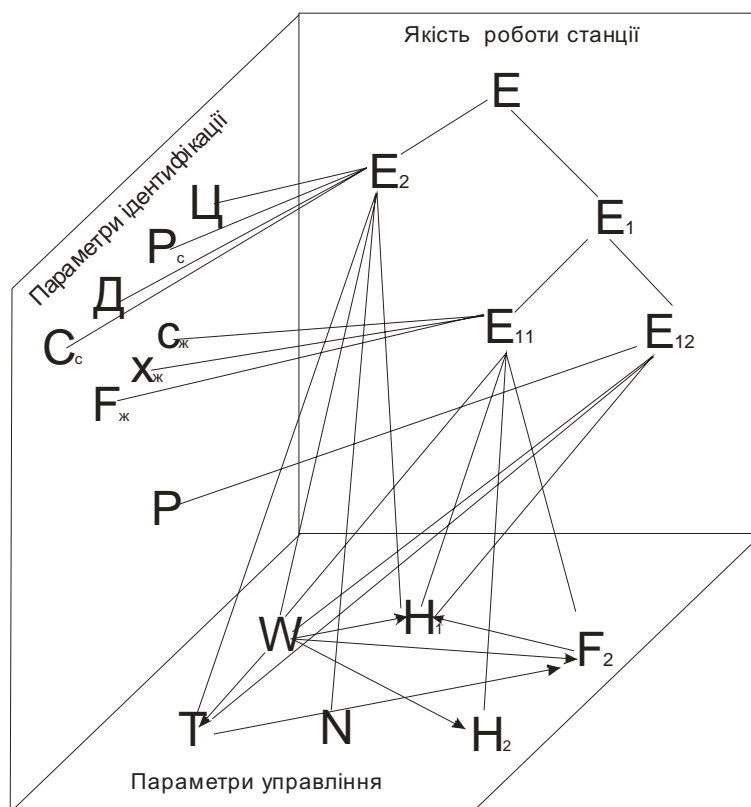


Рис.1 Зв'язаність параметрів що впливають на процес сокодобування

Враховуючи вплив витрати дифузійного соку  $F_{dc}$  на втрати цукру в жомі та параметрів які впливають на можливість корекції витрати дифузійного соку [1,2], приймаємо, що вибір терма  $J_{dc}$  із множини  $J_{dc}$  матиме наступну залежність:

$$J_{dc} = f_{J_{dc}}(F_{dc}, W, E_{11}) \quad (12)$$

В основу прийняття рішень щодо можливості та характеру зміни часу перебування стружки в дифузійному апараті та ошпарювачі з урахуванням (4) і (5) може бути покладено:

$$M_{H1} = f_{M_{H1}}(L_1, V_1, W, H_1) \quad (13)$$

$$M_{H2} = f_{M_{H2}}(L_2, V_2, W, H_2) \quad (14)$$

При необхідності корекції втрат цукру в жомі необхідно врахувати якість стружки та втрати цукру в жомі і температуру сокодобування в даний час [1,2]:

$$\Theta_2 = f_{\Theta_2}(T_2, W, E_{11}) \quad (15)$$

Для аналізу розвитку мікроорганізмів використовують значення рН в колонії  $P_{dc}$  та результати вмісту молочної кислоти  $A$  (7), а параметрами, які впливають на невраховані втрати цукру будуть: якість стружки  $W$ , час дифузії  $H_2$ , температури  $T_2$ . Можливість та характер зміни часу дифузії  $M_{H1}$ , та температури  $\Theta_{11}$  вибираємо з врахуванням наступних залежностей:

$$M_{H11} = f_{M_{H11}}(W, H_2, P_{dc}) \quad (16)$$

$$\Theta_{11} = f_{\Theta_{11}}(W, T_2, P_{dc}) \quad (17)$$

Для прийняття рішень при корекції часу дифузії з метою покращення якості дифузійного соку необхідно врахувати якість стружки, оцінити час дифузії  $H_2$  та показники дифузійного соку  $E_2$ :

$$M_{H3} = f_{M_{H3}}(W, H_2, E_2) \quad (18)$$

В процесі прийняття рішень при корекції температурного режиму на дифузії при покращенні якості дифузійного необхідно врахувати показники:

$$\Theta_3 = f_{\Theta_3}(T_2, W, E_2) \quad (19)$$

Для визначення характеру зміни витрати дифузійного соку  $F_{dc}$ , введена залежність:

$$J_{dc_2} = f_{dc_2}(F_{dc}, W, E_2) \quad (20)$$

Терми, які відповідають необхідним діям для корекції параметрів такі ж, як і в попередньому прикладі.

Враховуючи вище викладене, оптимальний вибір параметрів, для корекції та характер їх змін, можна знайти з наступних залежностей, що подані в загальному вигляді.

Для керування втратами в жому :

$$D_{11} = \bigcup \left| J_{dc} \cap M_{H_1} \cap M_{H_2} \cap \Theta_2 \right| \quad (21)$$

Для зменшення показників неврахованих втрат :

$$D_{12} = \bigcup \left| M_{H_{11}} \cap \Theta_{11} \right| \quad (22)$$

Для покращення якості дифузійного соку :

$$D_2 = \bigcup \left| M_{H_3} \cap \Theta_3 \cap J_{dc_2} \right| \quad (23)$$

Для визначення дій з врахуванням всіх показників якості :

$$D = \bigcup \left| \begin{array}{l} (J_{dc}, M_{H_1}, M_{H_2}, \Theta_2) \\ \cap (M_{H_{11}}, \Theta_{11}) \\ \cap (M_{H_3}, \Theta_3, J_{dc_2}) \end{array} \right| \quad (24)$$

Логічне виведення для знаходження вихідної змінної D можна представити у вигляді дерева рис 2.

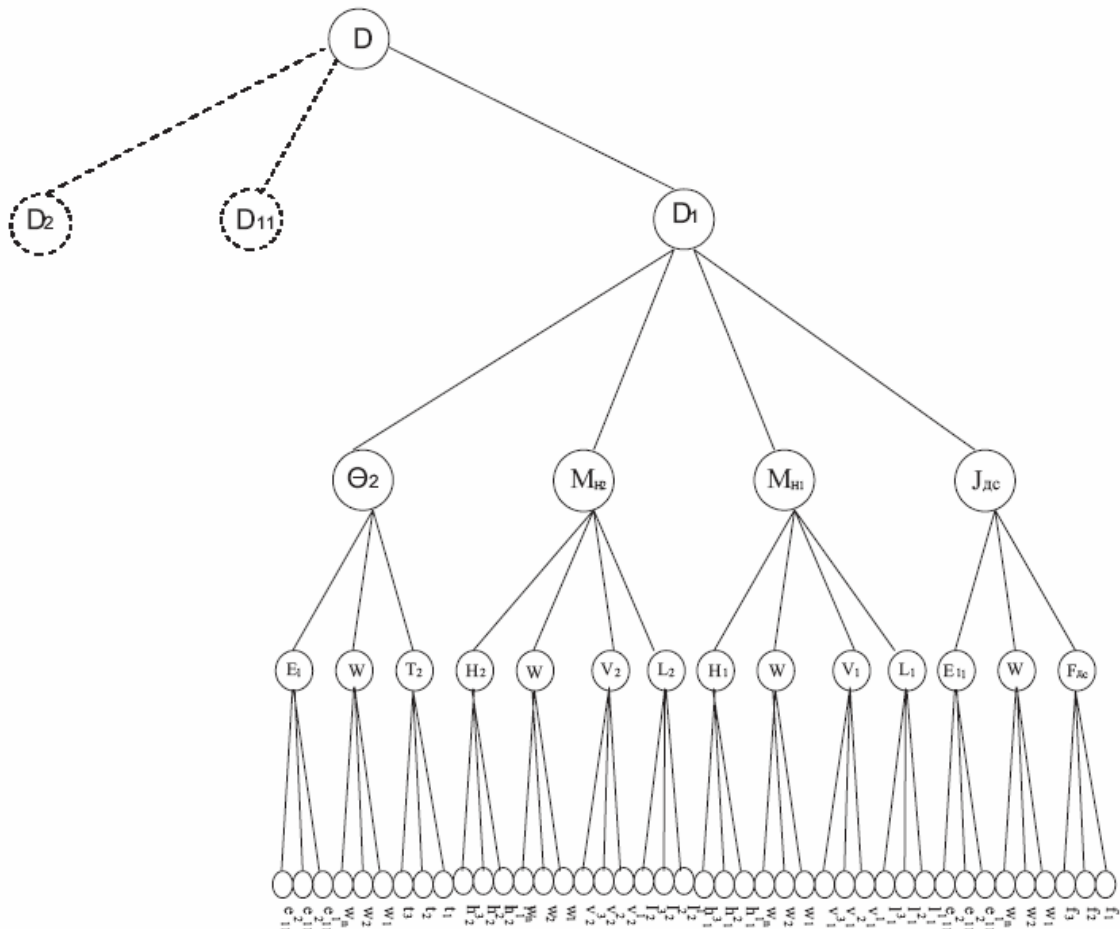


Рис.2 Фрагмент дерева логічного виведення

Використовуючи теорію нечітких множин змінні представлені у вигляді лінгвістичних термів:

- для вхідних параметрів виділені наступні терми: нижче норми, норма, вище норми;
- для визначення характеру зміни відповідного параметру використовуються терми: неможливо зменшувати – бажано збільшити, можливо зменшувати – бажано збільшити, можливо збільшувати – можливо зменшувати, можливо збільшити – бажано зменшувати, неможливо збільшити – бажано зменшувати.

При виборі дії в області одного показника якості проводиться порівняння ваги терма для кожного параметра.

Аналізуючи представлене на рис.2 дерево логічного виведення для рішень, можна зробити висновок, що збір експертних даних буде ускладнюватись внаслідок великої розмірності бази знань, тому доцільно використати ієрархічну базу знань.

Для прийняття рішень при вирішенні задач стосовно втрат цукру в жомі виділені наступні матриці знань.

Для витрати дифузійного соку:

$$\bigcup_{n=1}^h [(F_{\partial c} = f_{\partial c}^i) \wedge (E_{11} = e_{11}^r) \wedge (W = w_M)] \rightarrow J_{\partial c}^s, \quad (25)$$

$$n = \overline{1, h}; i, M, r = \overline{1, 3}; s = \overline{1, 5}$$

Для часу ошпарювання та часу дифузії відповідно :

$$\bigcup_{n=1}^h [(L_1 = l_1^i) \wedge (V_1 = v_1^r) \wedge (W = w_M) \wedge (H_1 = h_1^g)] \rightarrow M_{H_1}^s, \quad (26)$$

$$n = \overline{1, h}; i, M, r, g = \overline{1, 3}; s = \overline{1, 5}$$

$$\bigcup_{n=1}^h [(L_2 = l_2^i) \wedge (V_2 = v_2^r) \wedge (W = w_M) \wedge (H_2 = h_2^g)] \rightarrow M_{H_2}^s, \quad (27)$$

$$n = \overline{1, h}; i, M, r, g = \overline{1, 3}; s = \overline{1, 5}$$

Для температурного режиму в дифузійній колоні :

$$\bigcup_{n=1}^h [(T_2 = t_i) \wedge (E_{11} = e_{11}^r) \wedge (W = w_M)] \rightarrow \Theta_2^s, \quad (28)$$

$$n = \overline{1, h}; i, M, r = \overline{1, 3}; s = \overline{1, 5}$$

з врахуванням (25), (26), (27), (28) матриця знань вирішена стосовно втрат цукру в жомі прийме вигляд:

$$\bigcup_{n=1}^{n_h} [(J_{\partial c} = g_{\partial c}^s) \wedge (M_{H_1} = m_{H_1}^s) \wedge (M_{H_2} = m_{H_2}^s) \wedge (\Theta_2 = \theta_2^s)] \rightarrow D_{11} \quad (29)$$

$$s = \overline{1, 5}, \quad n = \overline{1, h}$$

Користуючись аналогічним підходом, можна сформувати матриці знань для прийняття рішень при вирішенні задач для корекції неврахованих втрат та якісних показників жому. А саме:

- для вибору варіантів рішень при розгляді неврахованих втрат:

$$\bigcup_{n=1}^h [(M_{H_2} = m_{H_2}^s) \wedge (\Theta_2 = \theta_2^s)] \rightarrow D_{12} \quad (30)$$

$$s = \overline{1, 5}, \quad n = \overline{1, h}$$

- для вибору варіантів рішень при оцінці показників якості дифузійного соку:



$$\bigcup_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{s=\overline{1,5}} \left( \bigcap_{n=\overline{1,h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( J_{\Delta c} = g_{\Delta c}^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( \Theta_2 = \theta_2^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( M_{H_2} = m_{H_2}^s \right) \right] \right] \right] \right] \right] \rightarrow D_2 \quad (31)$$

Виходячи із (29), (30), (31) загальна база знань для підтримки прийняття рішень при корекції якісних показників роботи дифузійної станції матиме вигляд:

$$\bigcup_{a=1}^{\overline{x}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( J_{\Delta c} = g_{\Delta c}^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( \Theta_2 = \theta_2^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( M_{H_1} = m_{H_1}^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( M_{H_2} = m_{H_2}^s \right) \right] \right] \right] \right] \right] \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( M_{H_2} = m_{H_2}^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( \Theta_2 = \theta_2^s \right) \right] \right] \right] \right] \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left[ \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( M_{H_2} = m_{H_2}^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( \Theta_2 = \theta_2^s \right) \bigcap_{n=1}^{\overline{h}} \left( J_{\Delta c_2} = g_{\Delta c_2}^s \right) \right] \right] \right] \right] \rightarrow D \quad (32)$$

$a = \overline{1,x}, \quad n = \overline{1,h}, \quad s = \overline{1,5}$

Запропонований алгоритм пошуку рішень та підходи до створення бази знань використовується для розробки підсистеми підтримки прийняття рішення при управлінні якісними показниками роботи дифузійної станції.

In the article the algorithm of search of decisions and approaches is examined to creation of base of knowledges which are used for development of subsystem of support of decision-making at a management the high-quality indexes of work of the diffusive station.

1. Технологические отклонение в сахарном производстве (причины, предупреждение, устранение) под ред. А. Коваржика: перевод с чешского – М.: Агропромиздат, 1986.- 262 с.
2. Сапронов А.Р. Технология сахарного производства – М.: Колос, 1998. – 495 с.
3. Инструкция по ведению технологического процесса свеклосахарного производства Москва 1985
4. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І.В. Малежика. – К.: НУХТ, 2003. – 400 с.

## МОДЕЛИ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕОРИИ РАСПИСАНИЯ

Ускач А.Ф., Гогунский В.Д., Яковенко А.Е.

Большинство задач теории расписаний в общей постановке весьма привлекательны в силу их кажущейся простоты. Однако достижение даже небольшого прогресса на пути их решения связано, как правило, с огромными теоретическими и практическими трудностями. С точки зрения теории сложности, большинство задач теории расписаний относится к классу  $NP$ -сложных задач, требующих для своего решения разработки эвристических (приближенных) алгоритмов, учитывающих специфику рассматриваемой в задаче предметной области.

В теории расписаний основное внимание уделяется вопросам оптимального распределения и упорядочения конечного множества требований, обслуживаемых детерминированными системами с одним или несколькими приборами, при различных предположениях относительно характера их обслуживания.

В качестве приборов могут вычислительные машины, учебные помещения, преподаватели и т.п., в качестве требований – обрабатываемые детали, выполняемые программы, поезда, группы студентов и т.п.

При планировании учебного процесса могут быть выделены такие "блоки", как преподаватели, осуществляющие определенные работы по обучению студентов, учебные группы студентов, воспринимающие определенную информацию и т.д. Теория расписаний решает три класса задач – задачи упорядочения, распределения и согласования. Задача закрепления преподавателей за группами студентов и распределения учебных помещений принадлежит к классу распределительных задач [1].

Многокритериальность задачи составления расписания и сложность объекта, для которого строится математическая модель, обуславливает необходимость серьезного математического исследования объекта для увеличения функциональных возможностей алгоритмов составления расписаний без значительного усложнения модели и, как следствие, увеличения объемов используемой памяти и времени решения задачи.

В данной статье рассматриваются методы построения моделей задачи распределения в теории расписания для определения наиболее применимого метода.

1. *Линейная модель.* Построим математическую модель задачи распределения на примере расписания вуза в терминах линейного программирования: имеется  $N$  учебных групп, занятия проводятся в рабочие дни в полуторачасовые интервалы, которые будем называть парами. Пусть  $t$  – номер рабочего дня недели,  $t \in T_n$ , где  $T_n$  – множество номеров рабочих дней для группы  $n \in N$ ;  $j$  – номер пары,  $j = 1, \dots, J$ , где  $J$  – общее количество пар. С каждой учебной группой  $n$  в течение недели, согласно учебному плану, проводится  $W_n$  занятий.

Предположим  $p$  – номер (имя) преподавателя,  $p = 1, \dots, P$ . Введем в рассмотрение булево значение  $\delta_{nw_n}^p$  :

$$\delta_{nw_n}^p = \begin{cases} 1, & \text{если в группе } n \text{ занятие } w_n \text{ проводит преподаватель } p; \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

Учебная нагрузка преподавателей планируется до составления расписания занятий, вследствие чего на данном этапе величину  $\delta_{nw_n}^p$  можно считать заданной. Для каждого преподавателя  $p$ ,  $p = 1, \dots, P$  задана также его аудиторная нагрузка –  $N_p$  часов в неделю.

Задача составления расписания заключается в определении для каждого занятия дня недели и пары в этот день с учетом выполнения конструируемых ниже ограничений и минимизации некоторой целевой функции.

Введем следующие искомым булеву переменную:

$$y_{ntj}^{w_n} = \begin{cases} 1, & \text{если в группе } n \text{ в день } t \text{ на паре } j \text{ проводится занятие } w_n \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

Ограничения: для каждой группы  $n$  должны выполняться все аудиторские работы в течение недели:

$$\sum_{t \in T_n} \sum_{j=1}^J \sum_{w_n=1}^{W_n} y_{ntj}^{w_n} = W_n \quad \forall n = 1, \dots, N; \quad (1)$$

В любой день  $t$  на каждой паре  $j$  для каждой группы  $n$  может проводиться не более одного занятия:

$$\sum_{w_n=1}^{W_n} y_{ntj}^{w_n} \leq 1 \quad \forall n = 1, \dots, N; \quad \forall t \in T_{kr}; \quad \forall j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

Каждое занятие  $w_n$  соответственно для всех групп  $n$  может проводиться не более одного раза в любой день  $t$ :

$$\sum_{t \in T_n} \sum_{j=1}^J y_{ntj}^{w_n} \leq 1 \quad \forall n = 1, \dots, N; \quad \forall w_n = 1, \dots, W_n, \quad (3)$$

Если переменная  $y_{ntj}^{w_n}$  увязывают все виды занятий с временем их проведения, то произведение  $\delta_{nw_n}^p \cdot y_{ntj}^{w_n}$  связывает время проведения с именем преподавателя.

В каждый день  $t$  и в каждой паре  $j$  преподаватель  $p$  может вести не более одного занятия по одной дисциплине в одной группе:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{w_n=1}^{W_n} \delta_{nw_n}^p \cdot y_{ntj}^{w_n} \leq 1 \quad \forall j = 1, \dots, J; \quad \forall p = 1, \dots, P. \quad (4)$$

Каждый преподаватель  $p$  в течение недели должен провести аудиторские занятия:

$$\sum_{t \in T_n} \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{w_n=1}^{W_n} \delta_{nw_n}^p \cdot y_{ntj}^{w_n} = N_p \quad \forall p = 1, \dots, P. \quad (5)$$

Представленными соотношениями исчерпываются безусловные ограничения, с которыми всегда считаются при составлении расписания. Могут, однако, быть и специфические условия, прежде всего проведение отдельных видов работы по “верхней” или по “нижней” неделе (т.е. один академический час в неделю). Не исключены и другие специальные условия, но для упрощения модели они не рассматривались.

*Целевая функция:* рассмотрим выражение для величины аудиторной нагрузки в день  $t$  преподавателя  $p$ :

$$Q_t^p = \sum_{n=1}^N \sum_{w_n=1}^{W_n} \delta_{nw_n}^p y_{ntj}^{w_n} \quad (6)$$

Вводятся ограничения вида:

$$1 \leq Q_t^p + Mz_t^p \leq M \quad \forall t \in T_n; \quad \forall p = 1, \dots, P, \quad (7)$$

где  $M$  – произвольное положительное достаточно большое число;  $z_t^p$  – искомая булева переменная.

Из (7) вытекает, что если  $Q_t^p = 0$ , то  $z_t^p = 1$ , и если  $Q_t^p > 0$ , то  $z_t^p = 0$ .

С учетом указанного выше содержательного смысла критерия оптимизации в дополнительных ограничениях (7), а также вводя весовые коэффициенты статуса преподавателя  $\Omega_p$  (его ученые степени и звание, занимаемая должность, научно-общественная активность), получаем искомый критерий оптимальности:

$$\sum_{i \in T_n} \sum_{p=1}^P \Omega_p z_i^p \rightarrow \max . \quad (8)$$

Введенная целевая функция не является единственно возможной. Введение других целевых функций не меняет ограничений математической модели и методов решения задачи, но может существенно повлиять на результаты вычислений.

Поставленная задача максимизации линейной целевой функции при заданной системе ограничений является задачей линейного целочисленного булева программирования, поскольку все коэффициенты ограничений целочисленные в силу дискретности исходных данных задачи; кроме этого искомые переменные математической модели могут принимать только два значения.

К наиболее широко используемым приемам сокращения перебора относятся приемы, основанные на методе ветвей и границ или на методе неявного перебора. Эти приемы состоят в построении «частичных решений», представленных в виде дерева поиска и применении методов построения оценок, позволяющих отсекалть бесперспективные частичные решения. [1]

Другой подход – использование модификации симплекс-метода для случая задачи целочисленного линейного программирования [2].

Однако большая размерность данной задачи теории расписания и содержание значительного числа булевых переменных приводит к неизбежности экспоненциальности времени решения задачи не зависимо от выбора метода решения.

2. *Комбинаторный подход* сводится к целенаправленной перестановке пар работ в некоторой исходной последовательности, пока не будет получено оптимальное (близкое к оптимальному) решение. Сформулируем задачу распределения: пусть задано множество  $N$  групп учебного заведения, в которых работают множество  $P = \{1, 2, \dots, p\}$  преподавателей. Длительности  $t_{iL}$ ,  $i = 1, \dots, p$ ,  $L = 1, \dots, N$ , работ преподавателей в группах одинаковы (время проведения занятия). Не нарушая общности рассуждений, их можно считать равными единице. Необходимо построить расписание занятий без наличия «окон», при условии минимизации суммы моментов завершения распределения нагрузки преподавателей. Но так как некоторые  $t_{iL} = 0$  (не во всех группах у преподавателей есть нагрузка), то задача минимизации суммарного времени работы оказывается  $NP$ -трудной, что доказывается сведение ее к задаче о трехцветной раскраске 4-регулярного графа: дан неориентированный граф  $G = (X, U)$  без петель, степень каждой вершины которого равна четырем. Можно ли раскрасить вершины графа  $G$  в три цвета таким образом, что никакие две смежные вершины не окрашиваются в один цвет?

Рассмотрим соответствующую задачу распознавания: определить, существует ли расписание  $s^0$  (как с «окнами», так и без «окон») такое, что  $\sum_{i \in P} \bar{t}_i(s^0) \leq y$  (  $\sum_{i \in P} \bar{t}_i(s^0)$  – суммарное время работы преподавателей ) для заданного  $y$ .

Положим к примеру  $p = 95 / |X| + 5 / |U|$ ,  $P = \{1, 2, \dots, p\}$ ;  $n = 25 / |X| + 5 / |U|$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ . Так как число ребер произвольного графа равно полусумме степеней его вершин и по условию граф  $G$  4-регулярный, заключаем, что  $|U| = 2 |X|$ , т. е.  $p = 3n$ .

Множество  $N$  приборов разобьем на два подмножества  $N(U)$  и  $N(X)$ . Первое подмножество содержит  $5/|U|$  групп, соответствующих ребрам  $u_k \in U$  графа  $G$  и обозначаемых  $U_l(k)$ ,  $1 \leq l \leq 5$ ,  $1 \leq k \leq |U|$ . Второе подмножество состоит из  $25/|X|$  групп, соответствующих вершинам  $x_j \in X$  графа  $G$  и обозначаемых  $X_{lq}(j)$ ,  $1 \leq l \leq 5$ ,  $1 \leq q \leq 5$ ,  $1 \leq j \leq |X|$ .

Множество  $P$  преподавателей разобьем на три подмножества  $P(W)$ ,  $P(U)$ ,  $P(X)$ .

Множество  $P(W)$  преподавателей состоит из  $25/|X|$  преподавателей обозначаемых  $w_{lq}(j)$ ,  $1 \leq l \leq 5$ ,  $1 \leq q \leq 5$ ,  $1 \leq j \leq |X|$ . Если в графе  $G$  вершине  $x_j$  инцидентны ребра  $u_{k1}$ ,  $u_{k2}$ ,  $u_{k3}$ ,  $u_{k4}$ , то преподаватель  $w_{lq}(j)$ ,  $1 \leq l \leq 5$ ,  $1 \leq q \leq 5$ , работает в четырех группах  $U_l(k_1)$ ,  $U_l(k_2)$ ,  $U_l(k_3)$ ,  $U_l(k_4)$  из множества  $N(U)$ , а также в группе  $X_{lq}(j)$  и не работает во всех других группах.

Множество  $P(U)$  преподавателей состоит из  $5/|U|$  преподавателей, соответствующих ребрам  $u_k$  графа  $G$  и обозначаемых  $u_m(k)$ ,  $1 \leq m \leq 5$ ,  $1 \leq k \leq |U|$ . Преподаватель  $u_m(k)$  работает только в пяти группах вида  $u_l(k)$ ,  $1 \leq l \leq 5$ .

Множество  $P(X)$  преподавателей состоит из  $70/|X|$  преподавателей, соответствующих вершинам  $x_j$  графа  $G$  и обозначаемых  $x_{lm}(j)$ ,  $1 \leq l \leq 5$ ,  $1 \leq m \leq 14$ ,  $1 \leq j \leq |X|$ . Преподаватель  $x_{lm}(j)$  работает в пяти группах  $x_{lq}(j)$ ,  $1 \leq q \leq 5$ .

Таким образом, каждый преподаватель множества  $P$  должен работать ровно в пяти группах.

В результате дальнейших рассуждений можно показать, что задача о 3-раскраске 4-регулярного графа имеет решение тогда и только тогда, когда в построенной задаче существует расписание  $s^0$  такое, что  $\sum_{i \in P} \bar{t}_i(s^0) \leq 10p$  [1].

Поскольку задача о трехцветной раскраске 4-регулярного графа  $NP$ -полна и реализация ее сведена к рассматриваемой задаче распознавания путем выполнения полиномиального (относительно  $|X|$ ) числа операций, то задача построения расписания, минимизирующего суммарное время работы, в случае, когда все  $t_{il} \in \{0,1\}$ , является  $NP$ -трудной.

3. *Сетевое представление.* Зададим дополнительные условия в постановке задачи расписания (множество  $\{1, 2, \dots, L, \dots, M\}$  групп учебного заведения, в которых работают множество  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  преподавателей, длительности работы преподавателя в группе соответствует одному занятию): преподаватель  $k \in N$  проводит занятия в группах в определенном порядке  $(L_1^k, L_2^k, \dots, L_{r_k}^k)$ . Количество групп  $L_j^k$ ,  $j = \overline{1, r_k}$  для каждого преподавателя отвечает его нагрузке, т. е.  $L_j^k$  не обязательно различны.

Т. к. на практике порядок  $(L_1^k, L_2^k, \dots, L_{r_k}^k)$  не является заданным, то данное условие предполагает, используя элементы комбинаторики, определить число  $P$  комбинаций перестановок последовательностей  $(L_1^k, L_2^k, \dots, L_{r_k}^k)$ ,  $k \in N$ :

$$P = \prod_{k=1}^n r_k !$$

Полученное число говорит о количестве вариантов условий поставленной задачи.

Введем понятие операции как процесса проведения преподавателем занятия в группе. Т. е. процесс работы преподавателя  $k$  состоит в последовательном проведении занятий в  $r_k$  группах. Если преподаватель  $k$  проводит занятие в группе  $L$  в  $q$ -й по очереди раз, то эту операцию будем обозначать через  $(k, L, q)$ , а длительность ее выполнения через  $t(k, L, q)$ .

Представим все операции в виде точек (кружков) на плоскости. Каждая две операции  $(k_1, L_1, q_1)$  и  $(k_2, L_2, q_2)$  могут быть зависимы или независимы в том смысле, что календарное время выполнения одной из них оказывает или не оказывает влияние на календарное время выполнения другой. В условиях рассматриваемой задачи целесообразно выделить три вида бинарных межоперационных отношений.

Если  $k_1 \neq k_2$  и  $L_1 \neq L_2$ , то операции  $(k_1, L_1, q_1)$  и  $(k_2, L_2, q_2)$  являются независимыми. Графически они не соединяются никакими видами связей – ребрами, дугами и т. п.

Если  $k_1 = k_2 = k$ , то по условию задачи одна из операций, для определенности,  $(k_1, L_2, q_2)$  следует во времени за второй. В данном случае операция  $(k, L_2, q_2)$  не может быть начата раньше, чем закончится операция  $(k, L_1, q_1)$ . Графически операции  $(k, L_1, q_1)$  и  $(k, L_2, q_2)$  соединяются дугой, направленной от первой операции ко второй.

Если  $L_1 = L = L$  и  $k_1 \neq k_2$ , то операции  $(k_1, L, q_1)$  и  $(k_2, L, q_2)$  не могут выполняться одновременно, однако очередность их выполнения заранее не оговорена. В этом случае соединим операции ребром.

В результате получаем смешанный граф  $(X, \vec{U}, U)$ , где  $X$  – множество операций (вершин),  $\vec{U}$  – множество дуг,  $U$  – множество ребер. На рис. 1 изображен смешанный граф для 4-х групп и 3-х преподавателей.

Каждое допустимое расписание определяет календарные сроки проведения каждой операции и тем самым однозначно фиксирует определенные последовательности выполнения операций в каждой группе. Иными словами, каждому расписанию соответствует некоторый ориентированный бесконечный граф, порождаемый данным смешанным графом в результате замены всех его ребер дугами.

Каждый бесконтурный ориентированный граф определяет бесконечное число (допустимых) расписаний. Действительно, если приписать каждой дуге этого графа, соединяющей вершину  $(k_1, L_1, q_1)$  с вершиной  $(k_2, L_2, q_2)$ , число  $t(k_1, L_1, q_1)$  – длительность операции  $(k_1, L_1, q_1)$ . В результате получим сетевой график. Используя обычную технику сетевого планирования, можно определить время начала и окончания каждой операции, т. е. построить расписание проведения преподавателями занятий в группах. Таких расписаний, очевидно, можно построить сколь угодно много.

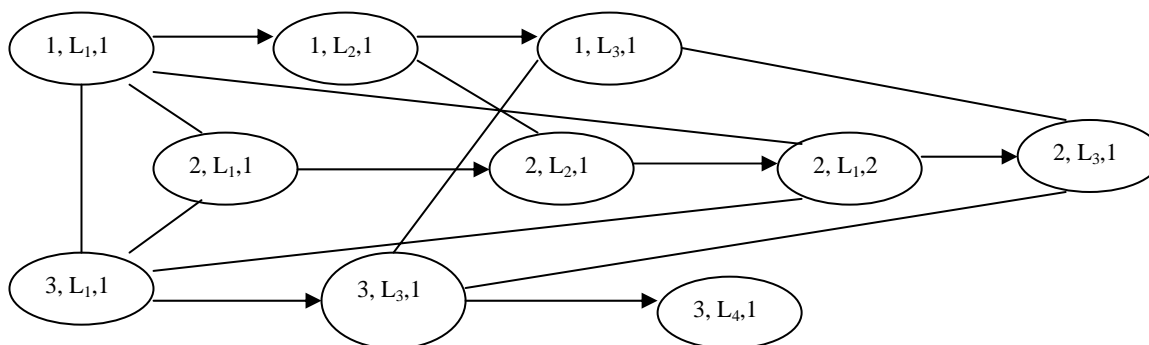


Рис. 1 Смешанный граф для 4-х групп и 3-х преподавателей

Для построения сетевого графика можно воспользоваться следующей процедурой:

а) в списке операций выбираем одну из операций, которая не следует ни за одной операцией списка;

б) заменяем все ребра в рассматриваемом смешанном графе, соединяющие выбранную операцию и другие операции списка, на исходящие из соответствующей ей вершины дуги. Удаляем операцию из списка;

в) если список операций исчерпан, процедура окончена, в противном случае переходим к пункту а).

Выбирая в п. а) различные операции, получаем в результате многократного применения данной процедуры все допустимые (относительно исходного смешанного графа) сетевые графики.

Поскольку нас интересует оптимальное (по быстродействию) расписание, то среди указанного множества расписаний целесообразно выделить расписание, при котором каждая операция начинает выполняться в момент времени завершения всех предшествующих ей операций. Тем самым каждому бесконечному графу, порождаемому рассматриваемым смешанным графом, будет соответствовать одно вполне определенное расписание.

На рис. 2 изображены два бесконтурных графа (сетевые графики), порождаемых графом, изображенным на рис. 1, в результате замены всех его ребер дугами. Каждой дуге соответствует длительность выполнения (1 – одно занятие), каждой вершине приписано

календарное время начала выполнения соответствующей операции. Сетевые графики дополнены вершиной Z – окончание всех операций.

Согласно сетевому графику первое расписание является более эффективным, чем второе.

Таким образом, задача построения оптимального по быстродействию расписания может быть решена перебором конечного числа возможных вариантов расписаний. Этот перебор определяется числом бесконтурных графов, порождаемых данным смешанным графом.

4. *Эвристический подход.* Описанный выше метод построения допустимых расписаний включает построение бесконтурного ориентированного графа и последующие вычисление необходимых временных характеристик по полученному сетевому графику.

Конструирование графа осуществляется пошагово и на каждом шаге осуществляется выбор очередной операции из множества возможных претендентов. От того, насколько правильно на каждом шаге осуществляется этот выбор, зависит качество получаемого в дальнейшем допустимого расписания.

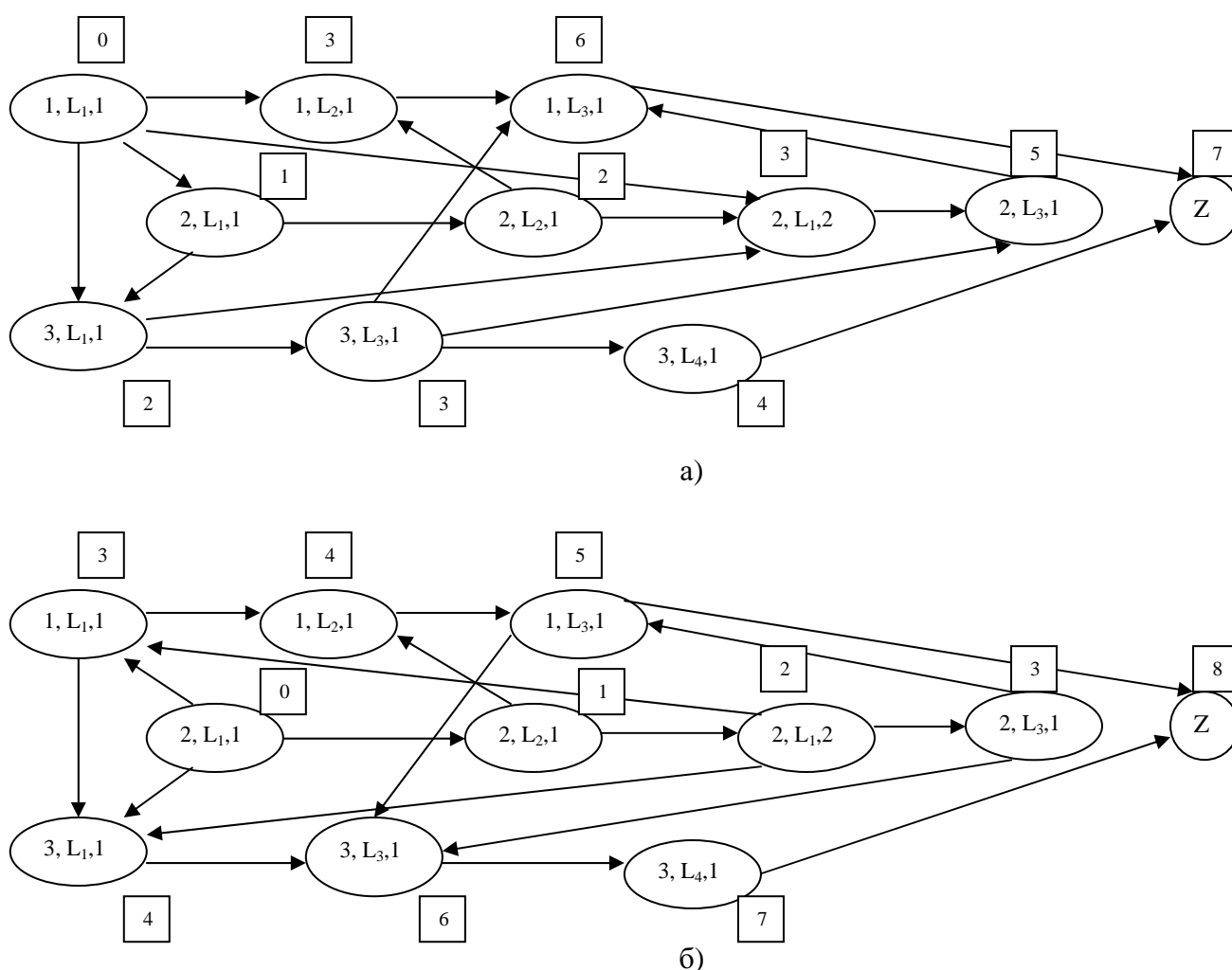


Рис. 2 Бесконтурные графы (сетевые графики)

Поскольку анализ всех возможных последствий выбора той или иной операции практически не реализуем, появляется необходимость принимать решение в условиях относительной неопределенности, на основе анализа ограниченного объема информации, имеющейся к моменту принятия решения. Поэтому представляется целесообразным совместить процессы конструирования сетевого графика и расчеты соответствующих временных характеристик [3].

Выбор операции должен проводиться с учетом имеющейся информации с тем, чтобы обеспечить достаточно высокое качество получаемого расписания. С другой

стороны, степень полноты учета этой информации определяет скорость построения отдельного расписания, следовательно, число допустимых расписаний, генерируемых за приемлемый промежуток времени.

Известны генераторы, которые за достаточно большой промежуток времени позволяют построить все допустимые расписания ( $\Gamma(R)$  — генератор с равновероятной выборкой, выбирает любую операцию из множества  $l$  возможных на данном шаге претендентов с вероятностью  $1/l$ ); генераторы, исключаящие из рассмотрения заведомо неконкурентоспособные расписания ( $\Gamma(A)$  — генератор активных расписаний, который при выборе дает предпочтение операции не изменяющей календарное время начала выполнения других операций, в противном случае также выбирает любую операцию с вероятностью  $1/l$ ).

Наиболее распространены на практике генераторы, использующие разнообразные правила предпочтения (приоритеты). Но они не гарантируют получения оптимального расписания.

В генераторе LRT (longest remaining time) заложено правило быстрее обслужить требование, общая длительность обслуживания которого является наибольшей (преподаватель с наибольшей нагрузкой).

Генераторы FIFO, LIFO (First In— First On, Last In— Last On) используют правило «первый пришел— первый обслуживается» и «последний пришел — последний обслуживается» соответственно, в первом случае выбирается операция с наименьшим календарным временем начала выполнения, во втором— с наибольшим.

Существует также множество видов генераторов, которые используют одновременно несколько даже противоречивых условий с равной вероятностью, например, правила генераторов FIFO и LIFO. Эффективность выбора того или иного генератора определяется временем решения поставленной задачи.

#### **Выводы:**

1. В работе предложены линейная и сетевая модели задачи распределения в теории расписания.

2. Не зависимо от выбора алгоритма и модели данной задачи, ее решение является трудоемким за счет большого числа входных данных и переменных, и поэтому, обобщая модель задачи распределения, не следует пренебрегать ее частными результатами.

3. Использование статистического подхода по выявлению эффективного алгоритма решения задачи распределения в теории расписаний требует разработки статистической модели предметной области, основной задачей которой является генерация исходных данных в соответствии с установленными законами распределения случайных величин. Естественно, что множество исходных данных должно быть сформировано в соответствии с требованиями и ограничениями, накладываемыми предметной областью.

3. Эффективность решения задачи распределения в теории расписания возрастает при комплексном и последовательном использовании рассмотренных алгоритмов.

In article methods of construction of models of a problem of distribution in the theory of the schedule with the purpose of definition a method are considered.

1. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсевич В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы.— М.: Наука, 1989. — 328 с.

2. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях.—М.: Мир, 1979.— 519 с.

3. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.Н. Теория расписаний. Одностадийные системы.— М.: Наука, 1984. — 381 с.



## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ

УДК 519.873

### ОПТИМАЛЬНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ НАРАБОТКИ КАЖДОГО ЭЛЕМЕНТА

Песчанский А.И.

#### Введение

За счет совершенствования математического обеспечения технического обслуживания (ТО) сложных систем в процессе эксплуатации можно получить существенный экономический эффект. Проблемой ТО сложных систем занимались многие исследователи. Обзор результатов по различным стратегиям ТО систем можно найти, например, в работах [1-4]. В монографии [4] исследована задача оптимального управляющего воздействия на эксплуатацию цепочки последовательно соединенных элементов с учетом наработки на отказ всей системы и дублированных систем с облегченным и ненагруженным резервом.

В данной статье рассмотрена стратегия ТО дублированной системы с нагруженным резервом и мгновенной индикацией отказа с учетом суммарной наработки на отказ каждого элемента. Относительно длительностей безотказной работы элементов, их восстановлений и ТО предполагается, что они являются случайными величинами с распределениями общего вида. Для решения задачи привлекается аппарат полумарковских процессов с дискретно-непрерывным множеством состояний. Находится стационарное распределение вложенной цепи Маркова, определяются стационарные характеристики функционирования системы: коэффициент технического использования, средний удельный доход, приходящийся на единицу календарного времени, средние удельные затраты, приходящиеся на единицу времени исправного функционирования системы. Решается задача оптимизации величин наработок на отказ каждого элемента для проведения его ТО для достижения оптимальных значений указанных показателей качества функционирования системы.

#### Постановка задачи и построение математической модели

Рассмотрим систему, состоящую из двух параллельно соединенных элементов. Время безотказной работы каждого из них – случайная величина (СВ)  $\alpha_i, i=1,2$ , с функцией распределения (ФР)  $F_i(t) = P(\alpha_i \leq t)$ . Индикация отказа осуществляется мгновенно и начинается его восстановление (аварийное), которое длится случайное время  $\beta_i$  с ФР  $G_i(t) = P(\beta_i \leq t), i=1,2$ . Предполагается, что в момент, когда суммарная наработка  $i$ -го значения («возраст жизни») достигает заданного уровня  $\tau_i$ , начинается его предупредительно ТО, длительность которого - СВ  $\beta_i^p$  с ФР  $G_i^p(t) = P(\beta_i^p \leq t)$ . Как после аварийного восстановления, так и после ТО, все надежность характеристики элемента полностью обновляются. Считается, что все СВ имеют абсолютно непрерывные ФР и конечные математические ожидания.

Требуется определить следующие стационарные показатели качества функционирования системы: коэффициент технического использования  $K_u$ , среднюю удельную прибыль  $S$  в единицу календарного времени и средние удельные затраты  $C$  за

единицу исправного функционирования системы; найти оптимальные величины наработок  $\tau_i$ , при которых указанные показатели качества функционирования системы достигают оптимальных значений.

Функционирование системы опишем полумарковским процессом (ПМП)  $\xi(t)$  с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний [5,6]. Каждый элемент системы может находиться в трех физических состояниях: работоспособном, в состоянии аварийного восстановления и в состоянии предупредительного ТО.

Введем следующее множество полумарковских состояний системы

$$E = \{i(d_1, d_2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2); i(d_1, d_2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2)^{(i)}, d_i = 1; i = 1, 2\},$$

где  $i$  - номер элемента, изменившего свое физическое состояние последним. Компоненты вектора  $(d_1, d_2)$  указывают на физическое состояние соответствующего элемента:

$d_i = 1$  - элемент, находится в работоспособном состоянии,

$d_i = 0$  - проводится аварийное восстановление элемента,

$d_i = 2$  - проводится ТО элемента. Компоненты вектора  $(x_1, x_2)^{(i)}$ ,  $x_i = 0$ , фиксируют время с момента последнего изменения физического состояния  $i$ -го элемента до ближайшего момента изменения состояния другого элемента.

Компоненты вектора  $(u_1, u_2)$  равны суммарным наработкам соответствующих элементов в момент последнего изменения физического состояния системы, причем, если  $d_j = 2, j = 1, 2$ , считается, что  $u_j = \tau_j$ ;  $(u_1, u_2)^{(i)}$  - вектор, у которого  $u_i = 0$ .

Например, состояние  $1(1, 0)(0, x_2)(u_1, u_2)$  означает, что последним изменением состояния системы было восстановление работоспособности первого элемента, второй элемент находится в состоянии аварийного восстановления, до конца которого осталось время  $x_2$ , суммарная наработка элементов в тот момент составила соответственно  $u_1$  и  $u_2$ . Состояния  $1(1, d_2)(0, x_2)(0, u_2)$  и  $2(d_1, 1)(0, x_2)(u_1, u_2)$  соответствуют возобновлению работы после ТО соответственно первого и второго элементов.

Определим времена  $\theta$  пребывания системы в полумарковских состояниях. Обозначим через  $\Omega$  совокупность номеров компонент вектора  $(d_1, d_2)$  равных 1. Тогда

$$\theta_{i(d_1, d_2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2)} = \gamma_i^{(d_i)} \wedge x_{3-i} \wedge \bigwedge_{j \in \Omega} (\tau_j - u_j),$$

где  $\wedge$  - знак минимума, 
$$\gamma_i^{(d_i)} = \begin{cases} \alpha_i, & d_i = 1, \\ \beta_i, & d_i = 0, \\ \beta_i^p, & d_i = 2. \end{cases}$$

Определим вероятности и плотности вероятностей переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ)  $\{\xi_n, n \geq 0\}$ . Заметим, что из физического состояния  $d_i$   $i$ -й элемент может перейти в состояние  $d_i' = 1 \pm \sqrt{2d_i - d_i^2}$ , т.е. из работоспособного состояния 1 возможны переходы в состояние 0 (аварийное восстановление) и в состояние 2 (ТО); из состояния 0 - в 1; из состояния 2 - в состояние 1.

Из состояния 1 (11)  $(0, x_2)(u_1, u_2)$  возможен переход в одно из четырех состояний в зависимости от значения минимума величин  $\alpha_1 \wedge x_2 \wedge (\tau_1 - u_1) \wedge (\tau_2 - u_2)$ :

а) 
$$\frac{d}{dt} P\{1(1, 1)(0, x_2)(u_1, u_2) \rightarrow 1(0, 1)(0, x_2 - t)(u_1 + t, u_2 + t)\} = f_1(t),$$

если  $\alpha_1 < x_2 \wedge (\tau_1 - u_1) \wedge (\tau_2 - u_2)$ ,  $\alpha_1 \in dt$ ;

$$\text{б) } \frac{d}{dx_1} P\{1(1,1)(0, x_2)(u_1, u_2) \rightarrow 2(1,0)(x_1, 0)(u_1 + x_2, u_2 + x_2)\} = f_1(x_2 + x_1), x_1 > 0,$$

если  $x_2 < \alpha_1 \wedge (\tau_1 - u_1) \wedge (\tau_2 - u_2)$ ,  $\alpha_1 \in x_2 + dx_1$ ;

$$\text{в) } \frac{d}{dx_1} P\{1(1,1)(0, x_2)(u_1, u_2) \rightarrow 2(1,2)(x_1, 0)(u_1 + \tau_2 - u_2, \tau_2)\} = f_1(\tau_2 - u_2 + x_1), x_1 > 0,$$

если  $\tau_2 - u_2 < \alpha_1 \wedge x_2 \wedge (\tau_1 - u_1)$ ,  $\alpha_1 \in \tau_2 - u_2 + dx_1$ ;

$$\text{г) } P\{1(1,1)(0, x_2)(u_1, u_2) \rightarrow 1(2,1)(0, x_2 - \tau_1 + u_1)(\tau_1, u_2 + \tau_1 - u_1)\} = \bar{F}_1(\tau_1 - u_1),$$

если  $\tau_1 - u_1 < \alpha_1 \wedge x_2 \wedge (\tau_2 - u_2)$ .

Аналогично можно выписать вероятности переходов ВЦМ  $\{\xi_n, n \geq 0\}$  из остальных состояний.

**Определение стационарных показателей качества функционирования системы**

Фазовое пространство состояний системы  $E$  разобьем на два непересекающихся подмножества  $E_+$  и  $E_-$ :  $E_+$  - подмножество работоспособных состояний,  $E_-$  - подмножество отказовых состояний. К подмножеству  $E_+$  относятся состояния, в которых хотя бы один из элементов находится в работоспособном состоянии. В подмножество  $E_-$  входят состояния, в которых оба элемента находятся либо в состоянии аварийного восстановления, либо ТО:

$$E_- = \{i(d_1, d_2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2), i = 1, 2; d_j \neq 1, j = 1, 2\}$$

Среднюю стационарную наработку на отказ  $T_+$ , среднее стационарное время восстановления  $T_-$  и стационарный коэффициент технического использования  $K_u$  найдем по формулам [5,6]

$$T_+ = \frac{\int_{E_+} m(z) \rho(dz)}{\int_{E_-} \rho(dz) P(z, E_+)}, \quad T_- = \frac{\int_{E_-} m(z) \rho(dz)}{\int_{E_-} \rho(dz) P(z, E_+)}, \quad K_u = \frac{T_+}{T_+ + T_-}, \quad (1)$$

где  $\rho(\cdot)$  - стационарное распределение ВЦМ  $\{\xi_n, n \geq 0\}$ ,

$m(z)$  - средние времена пребывания в состояниях системы,

$P(z, E_+)$  - вероятности переходов ВЦМ  $\{\xi_n, n \geq 0\}$  из отказовых состояний в работоспособные.

Предположим, что для ВЦМ  $\{\xi_n, n \geq 0\}$  выполняются условия существования и единственности стационарного распределения [5]. Докажем следующую теорему.

Теорема. Стационарное распределение ВЦМ  $\{\xi_n, n \geq 0\}$  определяется формулами

$$\rho(i(d_1, d_2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2)) = \rho \Phi_1(u_1, x_1) \Phi_2(u_2, x_2), \quad (2)$$

$$\text{где } \Phi_j(u_j, x_j) = \begin{cases} h_j(u_j) \bar{G}_j(x_j), & d_j = 0, \\ v_j(u_j, x_j), & d_j = 1, \\ \bar{G}_j^p(x_j), & d_j = 2, \end{cases}$$

$$v_j(u_j, x_j) = f_j(u_j + x_j) + \int_0^{u_j} f_j(u_j + x_j - s) h_j(s) ds \quad - \text{ плотность прямого остаточного}$$

времени восстановления рекуррентного потока, порожденного СВ  $\alpha_j$ ,  $v_j(u_j, 0) = h_j(u_j)$  - плотность функции восстановления  $H_j(u_j)$ , порожденной СВ  $\alpha_j$ ,  $v_j(0, 0) \equiv 1, j = 1, 2$ ;

$$\rho = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^2 (1 + H_i(\tau_i)) (\tau_i + M\beta_i^p + M\beta_i H_i(\tau_i)) \right)^{-1}.$$

**Доказательство.** По определению стационарного распределения плотность  $\rho(\cdot)$  должна удовлетворять следующей системе интегральных уравнений

$$\begin{aligned} \rho(1(0, d_2)(0, x_2)(u_1, u_2)) &= \int_0^{u_m} f_1(t) \rho(1(1, d_2)(0, x_2 + t)(u_1 - t, u_2')) dt + \\ &+ \int_0^{u_m} \psi_2^{(d_2)}(t + x_2) \rho(2(1, d_2)(t, 0)(u_1 - t, u_2')) dt + f_m(x_m + u_m) \rho(m(1, d_2)(x_1 + u_m, x_2 + u_m)^{(m)}(u_2', u_2'')), \\ &x_1 = 0, \quad d_2 = \overline{0, 2}, \\ \rho(1(1, 1)(0, x_2)(u_1, u_2)) &= \int_0^{u_2} g_1(t) \rho(1(0, 1)(0, x_2 + t)(u_1, u_2 - t)) dt + \\ &+ \int_0^{u_2} f_2(t + x_2) \rho(2(0, 1)(t, 0)(u_1, u_2 - t)) dt + f_2(u_2 + x_2) \rho(2(0, 1)(u_2, 0)(u_1, 0)), \\ \rho(1(1, d_2)(0, x_2)(u_1, u_2)) &= \int_0^{\infty} g_1(t) \rho(1(0, d_2)(0, x_2 + t)(u_1, u_2')) dt + \\ &+ \int_0^{\infty} \psi_2^{(d_2)}(t + x_2) \rho(2(0, d_2)(t, 0)(u_1, u_2')) dt, \quad d_2 = 0, 2, \\ \rho(1(2, d_2)(0, x_2)(\tau_1, u_2)) &= \int_0^{u_m} \overline{F}_1(t) \rho(1(1, d_2)(0, x_2 + t)(\tau_1 - t, u_2')) dt + \\ &+ \int_0^{u_m} \psi_2^{(d_2)}(t + x_2) dt \int_0^{\infty} \rho(2(1, d_2)(t + s, 0)(\tau_1 - t, u_2')) ds + \overline{F}_1(\tau_1) \rho(1(1, d_2)(0, \tau_1 + x_2)(0, u_2')), \quad d_2 = 0, 2, \\ \rho(1(2, 1)(0, x_2)(\tau_1, u_2)) &= \int_0^{u_m} \overline{F}_1(t) \rho(1(1, 1)(0, x_2 + t)(\tau_1 - t, u_2 - t)) dt + \\ &+ \int_0^{u_m} f_2(t + x_2) dt \int_0^{\infty} \rho(2(1, 1)(t + s, 0)(\tau_1 - t, u_2 - t)) ds + \\ &+ \int_0^{\infty} f_m(x_m + u_m) \rho(m(1, 1)(x_1 + u_m, x_2 + u_m)^{(m)}(u_1 - u_m, u_2 - u_m)) dx_1, \\ \rho(1(1, d_2)(0, x_2)(0, u_2)) &= \int_0^{\infty} g_1^p(t) \rho(1(2, d_2)(0, t + x_2)(\tau_1, u_2')) dt + \\ &+ \int_0^{\infty} \psi_2^{(d_2)}(t + x_2) \rho(2(2, d_2)(t, 0)(\tau_1, u_2')) dt, \quad d_2 = 0, 2, \\ \rho(1(1, 1)(0, x_2)(0, u_2)) &= \int_0^{u_2} g_1^p(t) \rho(1(2, 1)(0, x_2 + t)(\tau_1, u_2 - t)) dt + \\ &+ \int_0^{u_2} f_2(t + x_2) \rho(2(2, 1)(t, 0)(\tau_1, u_2 - t)) dt + f_2(u_2 + x_2) \rho(2(2, 1)(u_2, 0)(\tau_1, u_2)), \end{aligned}$$

где

$$\psi_i^{(d_i)}(t) = \frac{d}{dt} \Psi_i^{(d_i)}(t), \quad \Psi_i^{(d_i)}(t) = \begin{cases} F_i(t), & d_i = 1, \\ G_i(t), & d_i = 0, \\ G_i^p(t), & d_i = 2, \end{cases} \quad u_m = \begin{cases} u_1 \wedge u_2, & d_2 = 1, \\ u_1, & d_2 = 0, 2, \end{cases}$$

$$u'_1 = \begin{cases} 0, & d_2 \neq 1, \\ u_1 - u_m, & d_2 = 1, \end{cases} \quad u'_2 = \begin{cases} u_2 - t, & d_2 = 1, \\ u_2, & d_2 = 0, \\ \tau_2, & d_2 = 2, \end{cases} \quad u''_2 = \begin{cases} u_2 - u_m, & d_2 = 1, \\ u_2, & d_2 = 0, \\ \tau_2, & d_2 = 2. \end{cases}$$

Аналогично выписываются 12 уравнений для состояний  $2(d_1, d_2)(x_1, 0)(u_1, u_2)$ .

Непосредственной проверкой можно убедиться, что формулы (2) определяют решение этой системы. Например, проверим, что функции

$$\begin{aligned} \rho(1(0,1)(0, x_2)(u_1, u_2)) &= \rho(1(1,1)(0, x_2)(u_1, u_2)) = \rho h_1(u_1) v_2(u_2, x_2), \\ \rho(2(1,1)(x_1, 0)(u_1, u_2)) &= \rho v_1(u_1, x_1) h_2(u_2), \rho(1(1,1)(0, x_2)(0, u_2)) = \rho v_2(u_2, x_2) \\ \rho(2(1,1)(x_1, 0)(u_1, 0)) &= \rho v_1(u_1, x_1), \end{aligned} \quad (3)$$

являются решениями уравнения

$$\begin{aligned} \rho(1(0,1)(0, x_2)(u_1, u_2)) &= \int_0^{u_m} f_1(t) \rho(1(1,1)(0, x_2 + t)(u_1 - t, u_2 - t)) dt + \\ &+ \int_0^{u_m} f_2(t + x_2) \rho(2(1,1)(t, 0)(u_1 - t, u_2 - t)) dt + \end{aligned}$$

$$+ f_m(x_m + u_m) \rho(m(1,1)(x_1 + u_m, x_2 + u_m)^{(m)}(u_1 - u_m, u_2 - u_m)), \quad x_1 = 0, u_m = u_1 \wedge u_2.$$

Действительно, подставляя в правую часть этого уравнения функции (3) и учитывая, что

$$\frac{d}{dt} v_i(u_i - t, x_i + t) = -f_i(x_i + t) h_i(u_i - t), \quad x_i \geq 0, i = 1, 2,$$

получаем

$$\begin{aligned} &\rho \int_0^{u_m} f_1(t) h_1(u_1 - t) v_2(u_2 - t, x_2 + t) dt + \rho \int_0^{u_m} f_2(t + x_2) v_1(u_1 - t, t) h_2(u_2 - t) dt + \\ &+ \rho f_m(x_m + u_m) v_{3-m}(u_{3-m} - u_m, x_{3-m} + u_m) = -\rho \int_0^{u_m} \frac{d}{dt} [v_1(u_1 - t, t) v_2(u_2 - t, x_2 + t)] dt + \\ &+ \rho v_1(u_1 - u_m, u_m) v_2(u_2 - u_m, x_2 + u_m) = \rho v_1(u_1, 0) v_2(u_2, x_2) = \rho h_1(u_1) v_2(u_2, x_2) = \\ &= \rho(1(0,1)(0, x_2)(u_1, u_2)). \end{aligned}$$

Зная стационарное распределение ВЦМ  $\{\xi_n, n \geq 0\}$ , а также среднее время пребывания системы в состояниях, которое определяется формулами

$$M\theta_{i(d_1, d_2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2)} = \int_0^{x_{3-i} \wedge \bigwedge_{j \in \Omega} (\tau_j - u_j)} \bar{\Psi}_i^{(d_i)}(t) dt,$$

найдем значения функционалов, входящих в формулы (1).

$$\begin{aligned} \int_{E_-} \rho(dz) P(z, E_+) &= \sum_{i=1}^2 \left[ \int_0^\infty dx_i \int_0^{\tau_1} du_1 \int_0^{\tau_2} \rho((3-i)(0,0)(x_1, x_2)^{(3-i)}(u_1, u_2)) du_2 + \right. \\ &+ \int_0^\infty dx_i \int_0^{\tau_1} \rho((3-i)(0,2)(x_1, x_2)^{(3-i)}(u_1, \tau_2)) du_1 + \int_0^\infty dx_i \int_0^{\tau_2} \rho((3-i)(2,0)(x_1, x_2)^{(3-i)}(\tau_1, u_2)) du_2 + \\ &\left. + \int_0^\infty \rho(i(2,2)(x_1, x_2)^{(i)}(\tau_1, \tau_2)) dx_{3-i} \right] = \rho \sum_{i=1}^2 (1 + H_i(\tau_i)) (M\beta_i^p + M\beta_i H_i(\tau_i)). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \int_{E_-} \rho(dz)m(z) = & \rho H_1(\tau_1)H_2(\tau_2) \left[ \int_0^\infty \overline{G}_2(x_2)dx_2 \int_0^{x_2} \overline{G}_1(t)dt + \int_0^\infty \overline{G}_1(x_1)dx_1 \int_0^{x_1} \overline{G}_2(t)dt \right] + \\
 & + \rho H_2(\tau_2) \left[ \int_0^\infty \overline{G}_2(x_2)dx_2 \int_0^{x_2} \overline{G}_1^p(t)dt + \int_0^\infty \overline{G}_1^p(x_1)dx_1 \int_0^{x_1} \overline{G}_2(t)dt \right] + \\
 & + \rho H_1(\tau_1) \left[ \int_0^\infty \overline{G}_1(x_1)dx_1 \int_0^{x_1} \overline{G}_2^p(t)dt + \int_0^\infty \overline{G}_2^p(x_2)dx_2 \int_0^{x_2} \overline{G}_1(t)dt \right] + \\
 & + \rho \int_0^\infty \overline{G}_1^p(x_1)dx_1 \int_0^{x_1} \overline{G}_2^p(t)dt + \rho \int_0^\infty \overline{G}_2^p(x_2)dx_2 \int_0^{x_2} \overline{G}_1^p(t)dt = \rho \prod_{i=1}^2 (M\beta_i^p + M\beta_i H_i(\tau_i)). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Подмножество работоспособных состояний  $E_+$  содержит 16 состояний, поэтому функционал  $\int_{E_+} m(z)\rho(dz)$  равен сумме 16 интегралов. Покажем, как преобразовать, например, три из них.

$$\begin{aligned}
 & \int_0^\infty dx_2 \int_0^{\tau_1} ds_1 \int_0^{\tau_2} \rho(1(1,0)(0, x_2)(\tau_1 - s_1, u_2)) du_2 \int_0^{x_2 \wedge s_1} \overline{F}_1(t)dt + \int_0^\infty dx_2 \int_0^{\tau_2} \rho(1(1,0)(0, x_2)(0, u_2)) du_2 \int_0^{\tau_1 \wedge x_2} \overline{F}_1(t)dt + \\
 & + \int_0^\infty dx_1 \int_0^{\tau_1} ds_1 \int_0^{\tau_2} \rho(2(1,0)(x_1, 0)(\tau_1 - s_1, u_2)) du_2 \int_0^{x_1 \wedge s_1} \overline{G}_2(t)dt = \\
 & = \int_0^{\tau_1} \overline{F}_1(t)dt \int_t^\infty dx_2 \int_t^{\tau_2} \left( \int_t^{\tau_1} \rho(1(1,0)(0, x_2)(\tau_1 - s_1, u_2)) ds_1 + \rho(1(1,0)(0, x_2)(0, u_2)) \right) du_2 + \\
 & + \int_0^{\tau_2} \overline{G}_2(t)dt \int_t^\infty dx_1 \int_t^{\tau_1} \rho(2(1,0)(x_1, 0)(\tau_1 - s_1, u_2)) du_2 = \\
 & = \rho H_2(\tau_2) \left[ \int_0^{\tau_1} \overline{F}_1(t)(1 + H_1(\tau_1 - t))dt \int_t^\infty \overline{G}_2(x_2)dx_2 + \int_0^{\tau_2} \overline{G}_2(t)dt \int_t^{\tau_1} \overline{V}_1(z - t, t)dz \right] = \\
 & = -\rho H_2(\tau_2) \int_0^{\tau_1} \frac{d}{dt} \left[ \int_t^{\tau_1} \overline{G}_2(x_2)dx_2 \int_t^{\tau_1} \overline{V}_1(z - t, t)dz \right] dt = \rho M\beta_2 \tau_1 H_2(\tau_2), \\
 & \text{где } \overline{V}_1(z, t) = \int_t^\infty v_1(z, s)ds.
 \end{aligned}$$

Проводя аналогичные преобразования с остальными слагаемыми, в результате получаем

$$\int_{E_+} m(z)\rho(dz) = \rho \left[ \tau_1 \tau_2 + \tau_1 (M\beta_2^p + M\beta_2 H_2(\tau_2)) + \tau_2 (M\beta_1^p + M\beta_1 H_1(\tau_1)) \right]. \quad (5)$$

Следовательно, средняя стационарная наработка на отказ  $T_+$ , среднее стационарное время восстановления  $T_-$  и стационарный коэффициент технического использования  $K_u$  системы определяются формулами:

$$\begin{aligned}
 T_+ &= \frac{\tau_1 \tau_2 + \tau_1 (M\beta_2^p + M\beta_2 H_2(\tau_2)) + \tau_2 (M\beta_1^p + M\beta_1 H_1(\tau_1))}{(1 + H_1(\tau_1))(M\beta_2^p + M\beta_2 H_2(\tau_2)) + (1 + H_2(\tau_2))(M\beta_1^p + M\beta_1 H_1(\tau_1))}, \\
 T_- &= \frac{(M\beta_1^p + M\beta_1 H_1(\tau_1))(M\beta_2^p + M\beta_2 H_2(\tau_2))}{(1 + H_1(\tau_1))(M\beta_2^p + M\beta_2 H_2(\tau_2)) + (1 + H_2(\tau_2))(M\beta_1^p + M\beta_1 H_1(\tau_1))}, \\
 K_u &= 1 - \prod_{i=1}^2 \frac{M\beta_i^p + M\beta_i H_i(\tau_i)}{\tau_i + M\beta_i^p + M\beta_i H_i(\tau_i)}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Определим средний удельный доход  $S$ , приходящийся на единицу календарного времени и средние удельные затраты  $C$ , приходящиеся на единицу времени исправного функционирования системы. Для этого воспользуемся формулами [7]

$$S = \frac{\int_{\mathbb{E}} m(z) f_s(z) \rho(dz)}{\int_{\mathbb{E}} m(z) \rho(dz)}, \quad C = \frac{\int_{\mathbb{E}_+} m(z) f_c(z) \rho(dz)}{\int_{\mathbb{E}_+} m(z) \rho(dz)},$$

где  $f_s(z)$  и  $f_c(z)$  функции, определяющие соответственно доход и затраты в каждом состоянии.

Пусть  $c_i^0$  - доход в единицу исправного функционирования,  $c_i$  и  $c_i^p$  ( $i=1,2$ ) - соответственно плата за единицу времени аварийного восстановления и ТО  $i$ -го элемента, тогда нетрудно записать вид функций  $f_s(z)$  и  $f_c(z)$ . Например, выпишем значения этих функций для некоторых состояний:

$$f_s(z) = \begin{cases} c_1^0 + c_2^0, & z \in i(1,1)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2), \\ c_1^0 - c_2, & z \in i(1,0)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2), \\ -c_1 - c_2^p, & z \in i(0,2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, \tau_2), \end{cases}$$

$$f_c(z) = \begin{cases} 0, & z \in i(1,1)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2), \\ c_2, & z \in i(1,0)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, u_2), \\ c_1 + c_2^p, & z \in i(0,2)(x_1, x_2)^{(i)}(u_1, \tau_2). \end{cases}$$

После преобразований, аналогичным преобразованиям, используемым при выводе формул (4), (5), получаем:

$$S = \sum_{i=1}^2 \frac{c_i^0 \tau_i - c_i^p M \beta_i^p - c_i M \beta_i H_i(\tau_i)}{\tau_i + M \beta_i^p + M \beta_i H_i(\tau_i)},$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^2 (c_i^p M \beta_i^p + c_i M \beta_i H_i(\tau_i)) (\tau_{3-i} + M \beta_{3-i}^p + M \beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i}))}{\tau_1 \tau_2 + \sum_{i=1}^2 \tau_i (M \beta_{3-i}^p + M \beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i}))}.$$

### Оптимизация сроков проведения ТО

Задача определения оптимальных показателей качества функционирования системы сводится к отысканию абсолютных экстремумов функций  $K_u(\tau_1, \tau_2)$ ,  $S(\tau_1, \tau_2)$  и  $C(\tau_1, \tau_2)$ . Приравнявая нулю частные производные этих функций по переменным  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , после некоторых преобразований получаем систему уравнений, которым должны соответственно удовлетворять величины наработок  $\tau_i^k, \tau_i^s$  и  $\tau_i^c$ ,  $i=1,2$ :

$$\tau_i h_i(\tau_i) - H_i(\tau_i) = \frac{M \beta_i^p}{M \beta_i}, \quad i=1,2, \quad (6)$$

$$\tau_i h_i(\tau_i) - H_i(\tau_i) + \frac{c_i - c_i^p}{c_i + c_i^0} M \beta_i^p h_i(\tau_i) = \frac{M \beta_i^p}{M \beta_i} \frac{c_i^p + c_i^0}{c_i + c_i^0}, \quad i=1,2, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (c_i M \beta_i \tau_i h_i(\tau_i) - c_i^p M \beta_i^p - c_i M \beta_i H_i(\tau_i)) (\tau_{3-i} + M \beta_{3-i}^p + M \beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i}))^2 + \\ & + (M \beta_i \tau_i h_i(\tau_i) - M \beta_i^p - M \beta_i H_i(\tau_i)) (c_{3-i}^p M \beta_{3-i}^p + c_{3-i} M \beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i})) \times \\ & \times (M \beta_{3-i}^p + M \beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i})) + M \beta_i h_i(\tau_i) \tau_{3-i}^2 (c_i - c_i^p) = 0, \quad i=1,2. \end{aligned} \quad (8)$$

В случае существования единственных решений этих систем уравнений оптимальные значения показателей качества функционирования системы определяются формулами:

$$\begin{aligned} \max K_u &= 1 - \prod_{i=1}^2 \frac{M\beta_i h_i(\tau_i^k)}{1 + M\beta_i h_i(\tau_i^k)}, \\ \max S &= \sum_{i=1}^2 \frac{c_i^0 - c_i M\beta_i h_i(\tau_i^s)}{1 + M\beta_i h_i(\tau_i^s)}, \\ \min C &= \frac{\sum_{i=1}^2 (c_i^p M\beta_i^p + c_i M\beta_i H_i(\tau_i^c)) (\tau_{3-i}^c + M\beta_{3-i}^p + M\beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i}^c))}{\tau_1^c \tau_2^c + \sum_{i=1}^2 \tau_i^c (M\beta_{3-i}^p + M\beta_{3-i} H_{3-i}(\tau_{3-i}^c))}. \end{aligned}$$

Если системы уравнений (6) – (8) имеют несколько решений, оптимальные значения показателей находятся подстановкой каждого из них в формулу для случая единственного решения с последующим выбором наилучшего из них, причем необходимо учесть значение показателей при  $\tau_i = \infty$ .

Заметим, что для достижения максимальных значений коэффициента технического использования и средней удельной прибыли системы необходимо и достаточно оптимизировать соответствующие суммарные величины наработок на отказ каждого элемента, а оптимизация величин наработки на отказ каждого элемента еще не гарантирует минимальных средних удельных убытков всей системы.

The semi-markov model of maintenance for two-unit parallel system with allowance of age replacement is formulated. The optimal reliability and economical stationary values of system functioning quality are received.

1. Cho D.I., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems // Eur.J. Oper.Res. – 1991. – 51. – P.1-23.
2. Dekker R., Wildeman R.E. A review of multi-component maintenance models with economic dependence // Math. Methods of Oper.Res. – 1997. – 45. – P.411-435.
3. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
4. Каштанов В.А., Медведев В.И. Теория надежности сложных систем (теория и практика). – М.: Европейский центр по качеству, 2002. – 470 с.
5. Королук В.С., Турбин А.Ф. Процессы Марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
6. Корлат А.Н., Кузнецов В.Н., Новиков М.И., Турбин А.Ф. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 209 с.
7. Шуренков В.М. Эргодические процессы Маркова. – М.: Наука, 1989. – 336 с.



## КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА КОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ В АКУСТООПТИЧЕСКОМ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЕ

Рябкин Ю.В, Карнаух В.В.

**Введение.** Перспективным направлением построения приемных устройств быстрого распознавания источников радиоизлучения (ИРИ) является применение в их составе акустооптических анализаторов спектра (АОАС). Выделенные объекты ИРИ — это самолетные и корабельные РЛС, а так же РЛС средств ПВО и наземных служб, которые в процессе работы могут перестраивать не только частоту излучения, но и длительность зондирующих импульсов. В комплексах пассивной локации для обнаружения и идентификации современных ИРИ попадают и интересующие нас объекты. При использовании АОАС необходимо учитывать особенности его работы, вызванные конечным временем регистрации радиосигнала. С уменьшением длительности радиоимпульса резко ухудшается соотношение сигнал/шум в АОАС, что приводит практически к невозможному — обнаружение сигнала и измерение его параметров.

**Содержательная постановка задач.** Снижение эффективности акустооптического преобразования вызвано рядом таких эффектов, как нелинейной зависимости мощности дифрагированного лазерного излучения от длительности радиоимпульса и уменьшения энергии принимаемого полезного сигнала, в следствие расширения его спектра, на один фоточувствительный элемент датчика [1, 2]. Вышеуказанные эффекты приводят к тому, что без дополнительной обработки практически невозможно делать оценки несущей частоты для радиоимпульсов с длительностью меньше некоторой критической величины. Поэтому задача состоит в том, чтобы найти такой способ дополнительной обработки сигнала АОАС для компенсации одновременно как нелинейной зависимости эффективности акустооптического преобразования, так и уменьшения амплитуды спектральных составляющих вследствие расширения спектра сигнала, а также экспериментально проверить его работоспособность с помощью устройства обработки, которое реализует соответствующий этому способу алгоритм обработки сигнала. Такой способ обработки сигнала, по нашему мнению, не рассматривался.

Теоретической основой для разработки алгоритмов обнаружения сигнала может служить связь параметров входных радиосигналов с характеристиками оптических сигналов на выходе АОАС, учитывающая нелинейные эффекты, возникающие при прохождении коротких сигналов [3]. Входной радиоимпульс, представленный в виде зависимости напряженности электрического поля  $u(t)$  от времени  $t$  внутри акустооптического анализатора превращается в бегущий вдоль пространственной координаты  $x$  — апертуры акустооптического модулятора (АОМ) со скоростью  $V_A$  акустический сигнал

$$E(x, t) = k \cdot u \left( t - \frac{x}{V_A} \right) \text{rect}(x, A), \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент эффективности преобразования энергии радиосигнала в энергию акустической волны;  $\text{rect}(x, A)$  — функция прямоугольного окна, равного размеру ширины  $A$  участка апертуры АОМ, на котором может происходить брегговская дифракция лазерного излучения.

В результате брегговской дифракции когерентного лазерного излучения на акустической волне и пространственного Фурье-преобразования на тонкой цилиндрической линзе дифрагированного лазерного луча в задней фокальной плоскости в каждый момент времени  $t$  возникает пространственный оптический сигнал  $S(x, t)$ , пропорциональный про-

пространственному спектру  $s(t, \omega_x)$  сигнала (1), и регистрация которого осуществляется с помощью датчика в виде матрицы из линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС). Таким образом, выходной электрический сигнал в момент времени  $t$  для  $n$ -го фоточувствительного элемента акустооптического спектроанализатора равен

$$Y(X_n, t) = s_u \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} S^2(X, t) \text{rect}(X - X_1, \Delta X) \delta(X - \Delta X \cdot n) dX dX_1, \quad (2)$$

где  $S_n$  — коэффициент преобразования энергии сигнала в напряжение на выходе фоточувствительного элемента;  $X, X_1$  — вспомогательные переменные для описания соответственно дискретизации и усреднения пространственного сигнала;  $\text{rect}(X - X_1, \Delta X)$  — функция прямоугольного окна, равного размеру фоточувствительного элемента, определяющая ширину  $\Delta X$  участка пространственных координат, в пределах которой происходит усреднение пространственного сигнала;  $\delta(X - \Delta X \cdot n)$  — дельта-функция Дирака, описывающая пространственную дискретизацию с шагом  $\Delta X$ .

**Реализация квазиоптимальной обработки сигнала.** Оптимальным приемником пространственно-временного сигнала является коррелятор входного сигнала с ожидаемым известным сигналом  $Y(X_n, t)$ , имеющим постоянные параметры [4]. Для оптимальной фильтрации выходного электрического сигнала АОАС от шумов необходимо знать ожидаемый пространственный сигнал  $Y(X_n, t)$ , который связан со спектром анализируемого радиоимпульса. Реализация оптимального алгоритма фильтрации нестационарного сигнала затруднена по следующим причинам: во-первых, пространственный сигнал на выходе АОАС изменяется во времени; во-вторых, часто заранее неизвестна форма огибающей анализируемого радиоимпульса и его спектр; в-третьих, при наблюдении очень коротких радиоимпульсов не весь оптический сигнал размещается на фоточувствительной части ЛФПЗС. Поэтому, приняв некоторые эмпирические упрощения, проведем квазиоптимальную обработку сигнала АОАС.

Первым упрощением считаем, что огибающая радиоимпульса имеет прямоугольную форму и соответствующий ему акустический сигнал в АОМ тоже имеет прямоугольную форму, тогда выходной пространственный сигнал без обработки можно представить в виде:

$$S(X, t) = c(x_A(t), a) \frac{a \cdot x_A(t)}{2} \left[ \frac{\sin \frac{(X - X_0) \cdot x_A(t)}{2}}{\frac{(X - X_0) \cdot x_A(t)}{2}} + \frac{\sin \frac{(X + X_0) \cdot x_A(t)}{2}}{\frac{(X + X_0) \cdot x_A(t)}{2}} \right], \quad (3)$$

где  $c(x_A(t), a)$  — дифракционная эффективность АОМ;  $a$  — амплитуда несущей акустической волны в АОМ;  $x_A(t) = A \cdot K_{\text{АОМ}}(t)$  — длина цуга акустической волны, заполняющей апертуру АОМ в момент времени  $t$ , с коэффициентом  $K_{\text{АОМ}}(t)$  использования апертуры АОМ.

Второе упрощение связано с корректным выбором области рабочего режима, зависящего от  $X_0$  — координата максимума интенсивности световой волны и  $\Delta X(\tau_u)$  — размер окна, определяемый размером области пространственных частот, где сосредоточена заданная часть энергии сигнала. Будем считать, что в этой области нелинейные эффекты, связанные с дифракционной эффективностью АОМ невелики и величина дифракционной эффективности просто определяет общий масштабный коэффициент при формировании оптического пространственного сигнала. Это позволяет заменить выражение (3) выражением, которое описывает прямоугольное окно

$$S_{\Pi}(X, t) = c_s(\tau_u) \text{rect}(X, \Delta X(\tau_u)), \quad (4)$$

где  $c_s(\tau_u)$  — итоговая эффективность преобразования радиосигнала в оптический сигнал, учитывающая его нелинейную зависимость от  $\tau_u$  — длительности радиоимпульса.

Таким образом, квазиоптимальная пространственная обработка сигнала с акусто-оптического спектроанализатора состоит в нахождении пространственного корреляционного интеграла выходного сигнала (2) с опорным сигналом, определяемым выражением (4), с учетом времени  $\tau$  существования акустической волны в АОАС,  $\tau = \frac{A}{V_A} + \tau_u$ . Устрой-

ство, реализующее квазиоптимальный алгоритм обработки сигнала, нашло отражение в акустооптическом измерителе частоты [5]. Накопление данных пространственной обработки сигнала важно и для выбора порога при решении задачи оценки вероятности правильного обнаружения при стабилизированной вероятности ложной тревоги.

**Реализация и результаты тестирования алгоритма.** Выполнена экспериментальная проверка работоспособности алгоритма квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала АОАС. Целью эксперимента является проверка физической реализуемости предложенного способа сигнала и оценка полученного выигрыша соотношения сигнал/шум.

Измерения проводились по блок-схеме установки, приведенной на рис.1. Реализация способа пространственно-временной обработки сигнала АОАС выполнена в виде блока статистической обработки (БСО), представляющего собой коррелятор с функцией в виде прямоугольного окна (4), исходя из длительности радиоимпульса  $\tau_u = 0,5$  мкс и меньше. На вход АОАС через коммутаторы К1 и К2, открываемые импульсами от генератора импульсов ГИ, подавались сигналы высокочастотных генераторов ГВ1 и ГВ2, в результате формировались радиоимпульсы длительностью 2 мкс, 1 мкс, 0,5 мкс и 0,3 мкс и частотой повторения 640 мкс. Мощность генератора на используемых частотах составляла  $10^{-4}$  Вт. Два высокочастотных генератора ГВ1 и ГВ2 обеспечивали необходимый диапазон перестройки частот, а два коммутатора К1 и К2 — необходимую степень развязки коммутируемых каналов. Нагрузки коммутаторов принимали проходящее в них радиоизлучение при формировании радиоимпульсов. Регистрация измерений и сравнение сигналов фиксировались с помощью компьютера IBM PC.

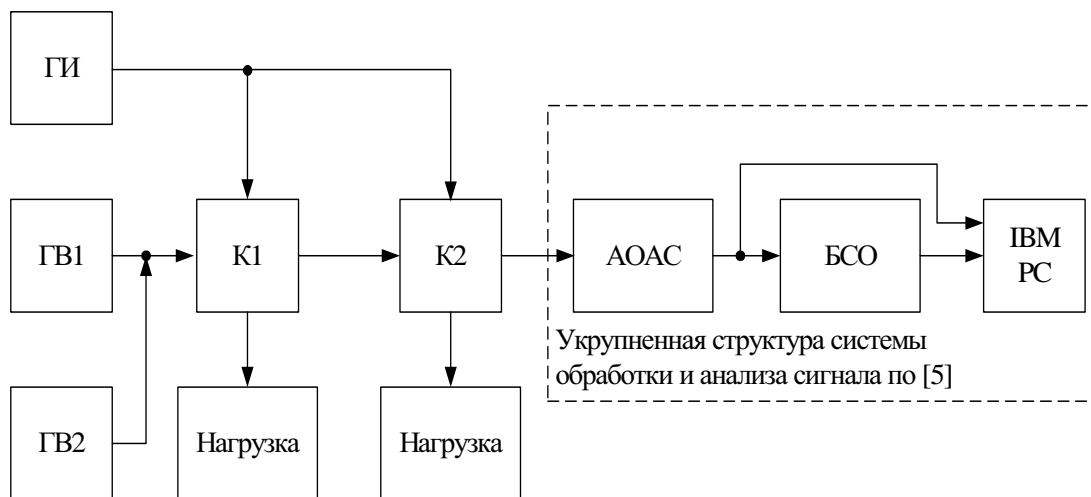


Рис. 1 Блок-схема установки для испытания БСО

В таблице приведены результаты амплитуд сигнала АОАС без использования модуля БСО (верхняя строка) и совместно с модулем БСО (нижняя строка). Анализ результатов эксперимента показывает, что с уменьшением длительности анализируемого радиоимпульса выигрыш от дополнительной обработки сигнала увеличивается. Так, на частотах 1,6–1,9 ГГц внутри рабочего диапазона при длительности огибающей 1–2 мкс выигрыш в амплитуде полезного сигнала незначительный и составляет 1,5–2 раза, а при длительности огибающей 0,5 мкс выигрыш составит около 10 раз. Отсутствие существенного выигрыша при  $\tau_u$  более 1 мкс объясня-

ется тем, что энергия соответствующего оптического сигнала сосредоточена на нескольких фоточувствительных элементах датчика, определяемых предельным размером дифракционным пятном при заданной апертуре  $A$  акустооптического модулятора. Оценить выигрыш при более коротких длительностях ( $\tau_{\text{и}}=0,5$  мкс) наблюдаемых радиоимпульсов без дополнительной обработки сигнала не представляется возможным, так как аппаратура вообще не регистрировала полезный сигнал. На границах рабочего (частоты 1,5 и 2 ГГц), по-видимому, сказываются как потери энергии при преобразовании радиоимпульса в акустический сигнал, так и уширение импульса при его прохождении через акустический облучатель.

$F$ , МГц	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$U$ [В]	0,5	2,7	1,3	1,5	2,5	2,5
$\tau=2$ мкс	0,38	4,3	4,8	2,6	4,48	2,09
$U$ [В]	0,3	1,4	0,38	0,7	2,2	1,75
$\tau=1$ мкс	0,32	2,60	3,02	3,88	3,90	3,00
$U$ [В]	0,4	0,5	0,2	0,3	0,25	0,3
$\tau=0,5$ мкс	0,32	1,44	2,16	2,91	2,68	0,8
$U$ [В]	—	—	—	—	—	—
$\tau=0,3$ мкс	—	1,20	0,80	0,70	1,60	—

### Выводы

1. На основе анализа временной эволюции пространственного спектра выходных сигналов АОАС предложен способ, повышающий эффективность акустооптического преобразования за счет дополнительной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора путем компенсации одновременно как изменяющегося во времени коэффициента использования апертуры АОМ, так и уменьшения амплитуды спектральных составляющих вследствие расширения спектра сигнала из-за нелинейной зависимости мощности дифрагированного лазерного излучения от длительности радиоимпульса.

2. Приводится алгоритм квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора с учетом времени существования акустической волны в АОАС.

3. Выполнена экспериментальная проверка предложенного способа пространственно-временной обработки сигнала АОАС. Приведены результаты сравнительного эксперимента без дополнительной обработки и с использованием блока БСО. Выигрыш от дополнительной обработки сигнала при длительности огибающей радиоимпульса 0,5 мкс составляет около 10 раз.

The way of acoustic-optic increasing is considering. It considering the nonlinear effects, tract arise at passage of short radio impulses. Quasioptimal algorithm for space-time signal processing by the receiver of non-stationary radio signals. Data of working capacity of algorithm and an estimation of a prize of its use are obtained at short duration observable radio impulses.

1. Корпел А. Акустооптика. — М.: Мир, 1993. — 304 с.
2. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — М.: Сов. радио, 1978. — 306 с.
3. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / О.Б. Гусев, С.В. Кулаков, Б.П. Разживин, Д.В. Тигин: Под ред. С.В. Кулакова. — М.: Радио и связь, 1989. — 136 с.
4. Кулаков С.В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов. — Л.: Наука, 1978. — 144 с.
5. Патент України №39604 А. Акустооптичний вимірювач частоти. Бюл. №5, 15.06.2001.

## ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЇ

Смітюх Я.В., Кишенько В. Д.

**Постановка проблеми.** Брагоректифікаційна установка (БРУ) відноситься до складних об'єктів управління, які в свою чергу вимагають складних систем управління. Подібного роду технологічна система характеризується надзвичайно складною взаємодією фаз та компонентів.

Процеси ректифікації мають складний фізико-хімічний характер поведінки. Потоки які в них приймають участь, як правило, багатofазні та багатокomпонентні. В ході перебігу процесу в кожній точці фази та на границях розділення фаз проходить перенос, енергії та маси [2,7]. Суттєва особливість процесу ректифікації спирту полягає в тому що сукупність складових його явищ носить детерміновано-стохастичну природу, що проявляється в накладенні стохастичних особливостей гідродинамічної обстановки в апараті на процеси тепло-масообміну та хімічні перетворення. Крім того суттєвими особливостями процесів брагоректифікації, є характерна нелінійна поведінка, що відносить БРУ до об'єктів, управління дослідження та оптимізацію, яких доцільно проводити в контексті методів нелінійної динаміки. Це пояснюється випадковими взаємодіями складових компонентів фаз, та характерного протікання тепло-масообмінних та гідродинамічних процесів, а також складним характером геометрії граничних умов в апараті.

Величини, що характеризують процес брагоректифікації, можуть бути розділені на вхідні (незалежні), які формують режими колон, і вихідні (залежні), які відображаються станом об'єктів. Оскільки для підтримки потрібного режиму розділення багатокomпонентної суміші необхідно управляти декількома величинами, а зміна однієї вхідної величини часто приводить до зміни всіх або декількох вихідних величин, брагоректифікаційна установка в цілому і кожна колона (з дефлегматором і конденсатором) окремо відносяться до класу багатозв'язних об'єктів управління з перехресними зв'язками [2], з значною кількістю підсистем та рівнів ієрархії, що пов'язані між собою складними структурними та функціональними співвідношеннями та мають взаємовплив між собою.

Системи управління процесами брагоректифікації, які діють на спиртзаводах, як показує практика не в достатній мірі забезпечують оптимальне управління процесами тепло-масообміну в брагоректифікаційних установках, що є важливою передумовою для глибокого аналізу та побудови оптимальних алгоритмів управління БРУ.

**Мета статті.** Метою роботи є побудова алгоритмів управління процесами брагоректифікації на основі сучасних підходів аналізу складних динамічних систем та алгоритмів оптимізації.

**Основний матеріал.** Найбільш перспективним шляхом розвитку систем управління є впровадження на виробництві багаторівневих інтелектуальних АСУТП.

Такі системи управління, на відміну від традиційних, повинні бути пристосовані до виявлення нових проблем, виробітку та реалізації дійових, гнучких стратегій управління з максимальною концентрацією ресурсів та їх раціональним використанням. Головна увага зосереджується на необхідних змінюваннях об'єкта управління, на усунення негативного та небажаного його розвитку, забезпечуючи його поведінку за суттєвим зв'язком із ситуацією, і направлене на досягнення заздалегідь визначених основних цілей. Ці головні цілі задають деяку множину підцілей, що оцінюються відповідними окремими критеріями, кожний з яких має різний рівень пріоритетності в залежності від умов функціонування систем, характеризується різноманітними, частіше всього конфліктного характеру, ситуаційними зв'язками з іншими критеріями. Пропонується алгоритм багатocільового управління БРУ на основі сценаріїв їх розвитку, як моделей процесу змінювання (за станом та під задачами [3]), що визначається на дискретному часовому просторі із заданим часовим кроком. Функціональні підсистеми системи управління БРУ передбачають розділення процесу управління

на планування (стратегічне, тактичне) та оперативне управління. Стратегічне планування полягає у побудові цільових програм

$$\langle Z, K, P, R, D, B \rangle, \quad (1)$$

де  $Z$  - система цілей по управлінню БРУ;  $K$ -система критеріїв;  $P$  - система переваг;  $R$  - ресурси управління;  $D$  - комплекс задач управління;  $B$  - характеристики БРУ. Задачами технічного планування є управління:

$$\langle S, Ц, M, L, Q, T \rangle, \quad (2)$$

де  $S$  – ситуації, що задаються певними відносинами на множині елементів (станів, підзадач);  $M$  - схеми згорток;  $L$  - множина правил класифікації;  $Q$  - множина цільових управляючих рішень;  $T$  - процедури синтезу рішень по управлінню.

Задача оперативного управління полягає у розв'язанні конфліктів при реалізації різних сценаріїв в умовах змінної цільової обстановки шляхом комп'ютерного аналізу динаміки розвитку ситуацій.

Виходячи з вище наведеного приводимо загальну постановку задачі  $Zb$  :

$$Zb = \langle S, K, X, f, P, r \rangle, \quad (3)$$

де  $S$  – множина рішень;  $K$  - множина критеріїв;  $X$  - множина шкал критеріїв;  $f$  - відображення множини рішень у множину векторних оцінок;  $P$  - система переваг особи яка приймає рішення(ОПР);  $r$  - вирішальне правило.

Постановка задачі характеризує мету ОПР,  $S$  - являє собою сукупність рішень, що задовольняють у кожній задачі певним обмеженням і розглянутих як можливі способи досягнення мети. Наслідки результатів рішення оцінюються за критеріями  $K_1, K_2, \dots, K_n$  і для кожного з них повинна бути задана шкала, що представляє множину упорядкованих оцінок  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , які утворюють безліч  $X$  і можуть мати як кількісну, так і якісну природу.

Рішення оцінюються по шкалах  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ , тобто множини припустимих векторних оцінок При вирішенні задач оптимального управління БРУ були виділені такі множини критеріїв:

Множина агрегованих критеріїв

$$F_{ki} = \left\{ \begin{array}{l} K_i \\ P_i \\ W_i \end{array} \right\}_i \quad \begin{array}{l} \text{-якість;} \\ \text{- продуктивність;} \\ \text{- витрати.} \end{array} \quad (3)$$

Математична модель яка ставиться в основу вирішення поставленої задачі представляє опис процесів масообміну та теплообміну на контактному пристрої[1,5].

Згідно з прийнятим методом детерміновані математичні моделі процесів ректифікації складаються з наступних рівнянь, які відображують основні загальні закономірності рівняння матеріальних балансів та рівняння кінетики масопередачі для легко летючого компоненту. Також в системі рівнянь входять нерівності та рівності які обмежують область, в якій математичний опис адекватний реальному процесу

Основні припущення при розгляді вказаних моделей наступні:

- 1) вплив в'язкості не враховується;
- 2) рух вздовж тарілки являється нестационарним;
- 3) горизонтальна складова швидкості  $u$  - залежить тільки від висоти тарілки  $z$  ;
- 4) нормальна компонента швидкості та тиск лінійно змінюються з глибиною

Такий підхід узгоджується з просторово-дискретним характером проходження процесу в колонах БРУ[1,2].

Математична модель задається наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} [(Hs_1 + s_2 h(H))nx^k] - \frac{\partial(Qnx^k)}{\partial l} \Delta l = \frac{\pi k_T D^3 \bar{n}}{6\tau} \left( y^k - \Phi^k x^k \sum_{j=1}^N \lambda^j y^j / \sum_{j=1}^N \lambda^j \Phi^j x^j \right) + Ghx, \\ \frac{\partial}{\partial t} [s_2(\Delta l - h_0)\bar{n}y^k] + \frac{\partial}{\partial l} (\pi k_T D^3 \bar{n}y^k / 6\tau) = \frac{\pi k_T D^3 \bar{n}}{6\tau} \left( \Phi^k x^k \sum_{j=1}^N \lambda^j y^j / \sum_{j=1}^N \lambda^j \Phi^j x^j - y^k \right) + Ghy, \\ \sum_{i=1}^N x_i = 1; \quad \sum_{i=1}^N y_i = 1, \end{cases} \quad (4)$$

де,  $s_1$  – площа перерізу патрубку;  $s_2$  – активна площа тарілки;  $k_T$  – число отворів в тарілці;  $D$  – діаметр одного отвору;  $n$  – число молів речовини в одиниці об’єму рідини;  $\bar{n}$  – число молів речовини в одиниці об’єму пари;  $x^k$  – мольна концентрація  $k$  – того компоненту в рідині(етанол);  $y^k$  – мольна концентрація  $k$  – того компоненту в парі(етанол);  $y^*$  – рівноважна концентрація спирту в парі;  $k_y$  – коефіцієнт масопередачі;  $Q$  – витрата рідини на тарілку;  $H$  – рівень рідини в переливному патрубку;  $h(H)$  – рівень рідини на тарілці;  $\Delta l$  – елементарна ділянка колони;  $\Phi_i^j$  – фізичний параметр пари(визначається на основі тепло-фізичних характеристик);  $\Phi^k$  – фізичний параметр пари(визначається на основі тепло-фізичних характеристик);  $V$  – витрата пари через  $i$  – ту тарілку;  $k$  – час утворення однієї бульбашки пари в рідині на  $i$  – тій тарілці;  $\lambda^j$  – питома теплота пароутворення  $j$ –го компоненту;  $h_0$  – рівень рідини після переливного патрубка тарілки;  $N$  – кількість компонент в бражці(розглядаються найбільш вагомні по впливу);  $Ghx$  – функція яка описує інтенсивність потоку рідини;  $Ghy$  – функція яка описує інтенсивність потоку пари;  $0 < l < L$  довжина колони;  $0 < t < T$  час диференціювання.

Таким чином, в системі  $2N + 2$  рівнянь та стільки ж невідомих:  $H, \bar{n}, x^k, y^k, k = 1, \dots, N$  тобто система замкнута. Для її вирішення потрібно задати початкові та граничні умови.

Перехід до системи рівнянь в частинних похідних корисний через те, що для цих систем є достатньо повна теорія, яка дозволяє передбачити деякі властивості вирішення ще до числових результатів. Для більшості промислових умов брагоректифікації перехід до систем рівнянь в частинних похідних зробити можливо. В точках вводу сировини в колони, де потоки та концентрації змінюються стрибкоподібно, необхідно записати рівняння матеріального балансу і користуватися ними як граничними умовами. Але з фізичної точки зору раціональніше записати різниці рівняння для звичайних диференційних рівнянь. В такому випадку ми не зв’язані потребою плавності функції, яке в деяких випадках може бути дуже жорстким.

З рівнянь системи (4) видно, що коефіцієнт масопередачі  $k_y = \pi k_T D^3 \bar{n} / 6\tau$ . Крім того для цих рівнянь слід покласти, що  $(Hs_1 + s_2 h_0(H))\bar{n} = H_x$ ;  $s_2(\Delta l - h_0)\bar{n} = H_y$ ;  $n\Delta l Q = L$ ;  $\pi k_T \bar{n} D^3 / 6\tau = V$ .

Оскільки в правій частині рівняння фігурує рівноважна концентрація -  $y^*$ , її розрахуємо за формулою:

$$y^* = \alpha x / (1 - (1 - \alpha)x), \quad (5)$$

де  $\alpha$  – відносна летючість  $k$  – того компоненту бражки(основні компоненти які визначають якісні властивості є метанол та етанол.

Також в основі визначення рівноважної концентрації можуть бути задані експериментальні дані.

Враховуючи попередні формули та визначення основних параметрів запишемо систему рівнянь масообміну на  $i$  – тій тарілці

$$\begin{cases} \frac{\partial(H_x x_i)}{\partial t} - \frac{\partial(Lx_i)}{\partial l} = k_y (y_i - y_i^*) + \rho_{1fi} + Ghx, \\ \frac{\partial(H_y y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(V_i y_i)}{\partial l} = k_y (y_i^* - y_i) + \rho_{2fi} + Ghy, 1 \leq i \leq N \end{cases} \quad (6)$$

де  $x_i, y_i$  – концентрації компоненту відповідно в рідині та в парі (мольні доли);  $L, V$  – потоки рідини та пару, кмоль/год;  $H_x, H_y$  – утримуюча здатність тарілки, кмоль/м;  $y_i^*, x_i^*$  – рівноважні концентрації моль%;

Ці рівняння виражають закон збереження кількості речовини кожного компоненту в рідкій та паровій фазах та характерну поведінку процесу ректифікації. Вираз  $k_y (y_i - y_i^*)$  визначає неперервний по всій довжині колони фазовий перехід  $i$ -того компоненту, що характерно для насадкових колон. Однак ці рівняння можна застосовувати для опису процесу ректифікації в багатотарільчатих колонах, в яких масообмін між фазами проходить в основному на тарілках.

Функції  $\rho_{1i}, \rho_{2i}$  визначають значення густини потоків  $i$ -того компоненту по довжині колони. Якщо за площу взяти площу поперечного перерізу колони, то функції  $\rho_{1i}, \rho_{2i}$  являються середніми густинами  $i$ -того компоненту в рідині та парі.

Оцінюючи статичні та динамічні режими роботи БРУ в цілому, а також кожної колони в окремому випадку можна записати модель:

$$Z_i = aV_i + bW_i x_{0i}, \quad (7)$$

$$E = cD - \sum_i Z_i, \quad (8)$$

де  $Z_i$  – виробничі затрати на процес в  $i$  – тій колоні;

$V_i$  – витрати пари на  $i$  – ту колону;

$W_i x_{0i}$  – втрати цільового продукту (етанолу) з кубовою рідиною ( $i = 1, 3$ );

$E$  – прибуток від функціонування БРУ;

$D$  – витрати (відбір) спирту-ректифікату;

$a, b, c$  – відповідні вартості.

Система оптимізації процесів брагоректифікації повинна забезпечити задану якість по вихідному цільовому продукту (спирту) при заданій продуктивності та мінімумі виробничих втрат. Ці показники повинні бути досягнуті в усталених режимах роботи БРУ.

При оптимізації параметрів процесів брагоректифікації оптимальним вважався режим при якому цільова функція мінімізується:

$$Z_i^* = \min Z_i = \min_{\{U_i\}} (aV_i + bW_i x_{0i}), \quad (9)$$

де  $i$  – номер колони;  $\overline{U}_i$  – вектор управління  $i$  - тою колоною

Перевага статичної оптимізації БРУ головним чином полягає в тому, що економічний ефект від оптимізації статичних режимів роботи БРУ значно переважає оптимізацію перехідних режимів. Такий висновок зроблений з аналізу статичних характеристик БРУ, що пов'язують цільову функцію управління з збурюючими та управляючими діями. Такий підхід ґрунтується на висновках зроблених з аналізу основних збурень. Визначено, що збурення які викликають довготривалі перехідні процеси пов'язані в першу чергу з кількісними показниками вмісту спирту в живленні колон  $x_{Fj}$ . Збурення такого типу є порівняно низькочастотними та повільно змінними. Як показують дослідження [1,2] більше 80% збурень по вмісту спирту в бражці  $x_{Fj}$  які мають перевищення 0,5 об. % виникають не частіше ніж через 4-16- часові інтервали а в свою чергу перехідні процеси не більше 1-1,5 години.

Виходячи з задач статичної оптимізації при виникненні такого роду збурень є необхідним зміна режиму роботи установки, тобто перехід на інші ділянки статичних характерис-



тик у відповідності до оптимальної цільової функції управління. В такому випадку система управління має підтримувати необхідний режим роботи БРУ на протязі всього часу впливу збурення  $(F_j, x_{Fj})$ .

В цілому управління процесами баргоректифікації являє собою багатокроковий процес прийняття рішень[1,2]. Кожний крок в процедурі вибору рішення пов'язаний з певною цільовою функцією управління БРУ і являє собою набір керуючих дій для  $j$ -ї колони.

Визначення багатокритеріального рішення по своїй природі компромісно і засновано на суб'єктивній інформації.

Процес знаходження рішення складається з двох етапів. На першому етапі відбувається розпізнавання образу ситуації. На наступному – за допомогою закладених алгоритмів оптимізації та сценаріїв здійснюється формування оптимального управління у відповідності до поставлених критеріїв управління БРУ.

Визначається таке рішення  $\chi^* \in \Gamma_\chi$ , яке при заданих умовах, зв'язках та обмеженнях оптимізує вектор ефективності  $y(\chi)$  і має такі припущення:

1. Визначення областей вирішення оптимальних по Парето;
2. Вибір схеми компромісів;
3. Нормалізація часткових критеріїв;
4. Врахування пріоритету часткових критеріїв.

Область  $\Gamma_\chi$  допустимих рішень по Парето складається з двох непересікаючих областей:

- а) Області згоди  $\Gamma_\chi^G$ ;
- б) Області компромісів  $\Gamma_\chi^k$  (область Парето, множина ефективних точок, множина непо-  
кращуємих рішень).

Для опису ситуації виконують структурований приблизний опис ситуації або явища, причому частинна визначеність опису є принциповою властивістю образу. Опис служить для встановлення відповідності образів, тобто доказу їх ідентичності, подібності, що здійснюється співставленням. Так, в розрізненні ситуації, образ описується вектором ознак, що характеризують відповідний об'єкт, та визначається деяким відношенням на множині параметрів  $\{Y\}$ , які характеризують стан об'єкта управління, множиною класів ситуацій  $\{K_S\}$ , що відображені в сценарії управління, множиною алгоритмів класифікації  $\{K_A\}$ , а також правилами вибору алгоритмів класифікації  $\{P_K\}$ .

$$\{Y\} = \{K_S, K_A, P_K\}, \quad (12)$$

В даній предметній області в якості образу приймається множина станів ТК, що дозволяє однозначно ідентифікувати ситуацію і віднести її до певного класу

В загальному випадку стратегія управляючої сторони  $X_i, i = 1, \bar{n}$  може бути скаляром, вектором, матрицею або ще більш складним утворенням.

За умов визначених яка з колон буде ведучою бражна колона або ректифікаційна колона (БК або РК) визначаються можливі постановки задачі оптимального управління БРУ[2]. При умові якщо визначено, що ведучою буде БК. То можливі дві наступні постановки, за відповідними критеріями:

- 1) максимізація продуктивності установки по вихідному живленню, тобто:

$$P = \max_{u \in U} (F_1 x_{F1}), \quad x_D \geq x_D^* \quad (13)$$

де  $E$  - цільова функція;  $u$  - вектор керуючих дій;  $U$  - область допустимих управлінь;

- 2) переробити задану кількість вихідної сировини з мінімальними виробничими втратами:

$$W(F_1^*, x_{F1}) = \min_{u \in U} Z, \quad x_D \geq x_D^* \quad (14)$$

де  $Z$  визначається за формулою (7).

У всіх випадках накладаються обмеження не тільки на управління, а й на регулюємі величини.

При умові, що ведучою буде РК то можливі такі наступні постановки оптимального управління:

1) максимізувати продуктивність установки по цільовому продукту заданої якості:

$$K = \max_{u \in U} D, x_D \geq x_D^* \quad (15)$$

2) виробити задану кількість цільового продукту заданої якості з мінімальними виробничими затратами:

$$W(D^*, x_D^*) = \min_{u \in U} Z, x_D \geq x_D^* \quad (16)$$

Приймемо:  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$  –  $n$  – вимірний вектор який характеризує сукупність образів ситуацій процесів брагоректифікації. Компоненти  $X_i$  зв'язані з конкретними фізичними та економічними показниками, тобто обмежені:

$$G_j = G_j(C_j, X) \geq b_j, j=1, m \quad (17)$$

$G_j$  – векторна функція;  $b_j$  – фіксована скалярна величина;  $C_j$  – деяка сукупність фіксованих величин (скаляр, вектор). Ці умови визначають область допустимих стратегій  $\Omega_x$ , тобто з цієї області ОПР обирає стратегію в даній ситуації[6].

Введемо позначення стан продукту на вході  $i$ -тої колони через  $F_{i-1}$  а на виході з неї через  $F_i$ . Під  $i$ -тим кроком управління та прийняття рішення інтелектуальною АСУ на основі розроблених алгоритмів. Під станом потоку продукту розуміється вектор  $\bar{F}_i = f(F_i, x_{F_i})$ , де  $F_i$  - витрата, а  $x_{F_i}$  - концентрація продукту. Назвемо  $i$ -тим кроком прийняття рішення системою про зміну керуючого вектору який формує режим колон[2]:

$$\bar{U}_i = u_i(V_i, D_i, G_i), \quad (18)$$

де  $V_i, D_i, G_i$  - управляючі дії для  $i$ - тої колони по витраті пари, відбору верхнього продукту, витраті охолодної води). При генеруванні оптимального рішення слід пов'язати керуючі дії для БРУ з критеріями та цільовими функціями управління. Для процесів ректифікації природним є визначення цільової функції як різниці вартостей до та після розділення, з вирахуванням витрат на створення даного режиму. З урахуванням вище викладеного можна зробити висновок, що прибуток  $e_i$  - який отримуємо становить:

$$e_i = f(F_i) - f(F_{i-1}) - \varphi(U_i), \quad (19)$$

де  $f(F_i)$  – вартість продукту в стані  $F_i$  (після  $i$ -тої колони);  $f(F_{i-1})$  - вартість продукту в стані  $F_{i-1}$  (до  $i$ -тої колони);  $\varphi(U_i)$  - витрати на створення режиму, який забезпечує дане розділення в  $i$  - тій колоні.

На основі проведених відповідних розрахунків  $e_i$  формуємо цільові функції оптимізації для кожної колони, і в такому випадку цільова функція має такий вигляд:

$$E_N(e) = \sum_{i=1}^3 \delta_i e_i, \quad (20)$$

де  $\delta_j$  - ваговий коефіцієнт з яким  $i$  – та цільова функція  $i$  – тої колони входить в загальну цільову функцію БРУ.

Розглянута адитивна функція пов'язана з вибором вектору управлінь (розмір вектору управлінь відповідає кількості регульованих змінних).

Вказаними обставинами з усіх можливих переходів з початкового стану до кінцевого виділяють ті які відповідають обмеженням:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = F_1^6, \\ x_{F_1} = x_{F_1}^6, \\ x_D = x_D^3, \\ D - \frac{F_1^6 x_{F_1}^6}{x_D^3} \leq \varepsilon, \end{array} \right. \quad (21)$$

де з індексом ( $z$ ) позначають задану величину, а з індексом ( $e$ )- вимірювана величина,  $\varepsilon$  - задана величина.

Області допустимих проміжних продуктових станів задаються нерівностями:

$$F_{i(\min)} \leq F_i \leq F_{i(\max)}, \quad (22)$$

$$x_{Fi(\min)} \leq x_{Fi} \leq x_{Fi(\max)}, \quad (23)$$

Вказані вище обмеження значно звужують область пошуку оптимального рішення. В таких випадках формується принцип оптимальності за яким досягаємо максимуму цільової функції:

$$E_N^*(e) = \max_R \sum_{i=1}^{N=3} \delta_i e_i, \quad (24)$$

де  $R$  - деяка обмежена область, обмежена умовами:

$$\sum_i \delta_i e_i > 0, \quad (25)$$

$$\delta_i > 0, \quad (26)$$

$$e_i \geq 0. \quad (27)$$

Ефективність дій оперуючої сторони оцінюється сукупність локальних критеріїв роботи БРУ  $K_i, P_i, W_k$  (якості, продуктивності та втрат), які мають коефіцієнти відносної важливості  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ . Тоді є два вектори:  $\Lambda = (\lambda_e), e=1, k$  і  $E = (E_e), e=1, k$ . Кожний критерій характеризує локальну мету операції і зв'язаний із стратегією відображенням.

$$E_e = E_e(A_e, X), e=1, k; \quad (28)$$

де  $A_e$  – сукупність фіксованих факторів.

Частинним випадком відображення  $X \rightarrow E_e$  є функціональна залежність між критерієм  $E_e$  і стратегією  $X_j$ .

Одночасне досягнення мети операції за всіма локальними критеріями при одній стратегії неможливо, тому рішення полягає в знаходженні компроміса в досягненні локальних цілей.

Так як генетичні алгоритми добре зарекомендували себе в якості методик пошуку в великих областях практично при повній відсутності інформації про властивості цільової функції і обмежень, в різних дослідах було розроблено декілька методів і підходів до використання генетичних алгоритмів для рішення багатокритеріальних оптимізаційних задач.

Для практичної реалізації поставленої задачі використовується нейро-еволюційний(нейро-генетичний) алгоритм. В якому головною є ідея гібридизації генетичних алгоритмів і сумісне їх використання, як з нейромережевими алгоритмами, так і з обраними аналітичними методами оптимізації.

В гібридному алгоритмі, докладно описаному нижче, для пошуку оптимальних рішень застосовується аналітичний метод оптимізації. Ця дія може бути виконана за допомогою нейронної мережі. Такий гібридний нейронно-генетичний алгоритм дозволяє вирішити поставлені задачі по оптимізації процесів брагоректифікації. В ньому для знаходження субоптимальних рішень даної багатокритеріальної задачі використовується нейронна мережа Хопфільда.

Гібридний алгоритм багатокритеріальної оптимізації заключається у виконанні наступних дій:

- 1) Визначення початкової множини оптимальних рішень. Генерація початкової популяції  $P$  яка має  $K$  початкових рішень  $x(0)$ ;
- 2) Паралельно застосовуємо оптимізаційний метод для  $K$  заданих початкових рішень в популяції;
- 3) Визначаємо матриці оцінок  $Y = [F_{mk}]$  на основі отриманих наближених оптимальних рішень  $x^*$  за допомогою нейромережевого оптимізаційного методу;
- 4) Присвоюємо ранг  $k$  для початкових станів  $x(0)$  на основі матриці оцінок  $Y$ ;

- 5) Перевіряємо на відповідність виконання поставленому критерію. Якщо у випадку досягнення пошук припиняємо;
- 6) Здійснюємо випадковий вибір початкових станів в банку генів, на основі використанні рангів;
- 7) Поточній популяції, знайдених рішень присвоюємо нулі.
- 8) Здійснюємо випадкову селекцію  $K/2$  пар батьків типу А і В та виконуємо їх переміщення в поточну популяцію з ймовірністю  $P_c$ ;
- 9) Виконуємо схрещування  $K/2$  батьків А і В з високою ймовірністю  $P_c$  та вставляємо  $K$  пар нащадків типа С і D в поточну популяцію;
- 10) Виконуємо видозміни(мутацію) випадково обраних персон з поточної популяції з невеликою ймовірністю  $P_m \cdot P_c$ ;
- 11) присвоюємо початковій множині  $P$  значення поточної популяції і переходимо на крок 2.

#### **Висновки.**

Розглянута математична модель та поставлені критерії для вирішення поставленої задачі оптимізації забезпечують гнучкість у формуванні оптимальних рішень по управлінню процесами брагоректифікації.

В приведеній процедурі формування багатокритеріальних управляючих рішень пошукові операції максимально спрощуються та оптимізуються за рахунок використання нейрогенетичного пошукового алгоритму.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє знайти оптимальні рішення та забезпечити достатню швидкодію при їх пошуку.

The method of decision of task of multicriterion optimization is offered in the article. In the context of decision set the problem a mathematical model and criteria is examined on the basis of which the search of optimum decisions is carried out on a management.

For the decision of task the neuro-genetic algorithm of multicriterion optimization is offered on the basis of scenarios, as models of change of parameters of process which is determined on a discrete sentinel space with the set sentinel step.

1. Стабников В.Н., Николаев А.П., Мандельштейн М.Л. Ректификация в пищевой промышленности. Теория процесса, машины, интенсификация. - Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 232 с.

2. Мандельштейн М. Л. Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации. - М.: Пищевая промышленность 1975. - 240 с.

3. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. - М.:Наука, 1986. - 288 с.

4. Стабников В.Н., Харин С.Е. Теоретические основы перегонки и ректификации спирта. М., Пищепромиздат, 1951. - 220 с.

5. Демиденко Н.Д. Управляемые распределенные системы. - Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. - 393 с.

6. Ладанюк А.П. Основы системного анализа. Навчальний посібник.-Вінниця, Нова книга, 2004.-176 с.

7. Кафаров В.В.,Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. М.,Наука, 1976. - 500 с.

# МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.7

## ОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С ОБРАТНОЙ МОДЕЛЬЮ

Клименко А.К.

**1. Постановка проблемы и ее связь с практическими заданиями.** Известны автоматизированные технологические объекты (АТО), в которых управление осуществляется по циклически повторяющимся программам. Примерами таких АТО являются металлорежущие станки с программным управлением и станы горячей прокатки. Управляющие программы готовятся в условиях неполной информации об объекте управления и возмущающих воздействиях. Поэтому требуется корректировка управляющих программ как во время их разработки, так и в процессе эксплуатации. Системы, в которых осуществляется такая корректировка, называются системами с самоустанавливающейся программой [1], самонастраивающимися системами «от детали к детали» [2,3] и адаптивными системами [4]. В данной статье будем называть их системами с адаптивной корректировкой управляющих программ.

При корректировке текущей программы используется информации об ошибках в предыдущих циклах ее воспроизведения. Эти ошибки суммируются с исходной программой при помощи дискретного интегратора.

Корректировка программ осуществляется по формуле

$$c_v(n) = c_{v-1}(n) - \gamma_v f\{\varepsilon_{v-1}(n)\}, n \in [0, N], v=1,2,\dots, \quad (1)$$

где  $n$  – дискретное время,  $v$  – номер цикла воспроизведения программы,  $N$  – количество кадров в программе,  $c_v(n)$  – корректирующий сигнал,  $\gamma_v$  – коэффициент усиления в контуре адаптивной корректировки,  $\varepsilon_{v-1}(n)$  – ошибка предшествующего цикла воспроизведения управляющей программы,  $f\{\cdot\}$  – функция, определяемая этой ошибкой и обеспечивающая сходимость процесса ее минимизации.

Ошибки изготовления деталей состоят из регулярной и случайной составляющих. Последняя является центрированной аддитивной. Источником ее могут выступать как процесс обработки деталей сложной формы, так и ошибки автоматического измерения размеров последних.

Если статистические характеристики регулярной составляющей возмущающего воздействия и случайной помехи стационарны, целью адаптации является формирование корректирующего сигнала, обеспечивающего сведение к нулю регулярной составляющей ошибки. Для этого требуется сходимость процесса (1). На обеспечение сходимости и на ее скорость влияет коэффициент усиления  $\gamma_v$  в контуре адаптации.

Имеется также проблема подстройки коэффициента усиления для минимизации ошибки воспроизведения программы в условиях, когда соотношение между регулярной и случайной составляющими могут медленно, но непредсказуемо изменяться во времени. Примером может служить случай, когда требуется корректировка программы обработки деталей по мере износа инструмента.

В этом случае требуется такая подстройка коэффициента усиления, которая минимизирует среднеквадратичную ошибку непосредственно следующего воспроизведения программы.

**Анализ известных решений.** Вопрос влияния коэффициента усиления на сходимость процесса адаптации рассматривался в ряде публикаций.

В [4] рассматривается сходимость процесса (1) при отсутствии случайных помех. Показано, что при выборе оптимального коэффициента усиления для полной корректировки программы число циклов самонастройки должно быть равно числу тактов дискретного времени в программе, что для практики недопустимо.

В работе [5] исследованы системы программного управления с непрерывным представлением управляющей информации. Показано, что процесс самонастройки в этом случае сходится только в области низких частот. Ошибка управления уменьшается при первых циклах воспроизведения программ и неограниченно растет в последующих циклах. Поэтому самонастраивающиеся системы этого типа не нашли практического применения, но полученные теоретические результаты применимы и для систем с дискретным представлением управляющей информации.

В [6] предлагается способ выбора оптимального коэффициента усиления в контуре самонастройки при управлении в условиях случайных возмущающих воздействий. Недостаток способа – для определения желаемого коэффициента усиления предварительно требуется большое количество воспроизведений управляющей программы с регистрацией ошибок и статистической обработкой результатов. На практике это означает производственные потери.

В решении задачи обеспечения сходимости процесса адаптации в условиях помех оказалось эффективным применение математического аппарата - метода стохастической аппроксимации. Обзор метода приведен в [7]. Рекомендации по его использованию даны в [3]. Проблемы обеспечения сходимости порождаются тем обстоятельством, что условия сходимости для регулярной и случайной составляющих ошибки различны. Как следует из [3,7], для обеспечения сходимости процесса (1) в условиях, когда регулярная и случайная составляющие возмущающего воздействия стационарны, коэффициент усиления должен удовлетворять требованиям:

$$\sum_{v=1}^{\infty} \gamma_v = \infty, \quad (2)$$

$$\sum_{v=1}^{\infty} \gamma_v^2 < \infty. \quad (3)$$

Условие (2) относится к регулярной составляющей ошибки, а условие (3) – к случайной составляющей. Выполнение последнего требует бесконечного числа циклов корректировки, что на практике нежелательно.

Как известно [8], применение обратных моделей (ОМ) динамических объектов создает предпосылки для решения многих задач в области управления. Использование ОМ АТО оказалось эффективным и в задаче обеспечения сходимости регулярной составляющей процесса (1). Это показано в работе [9]. Достоинством использования ОМ АТО является то, что, в случае отсутствия случайной помехи, регулярная составляющая ошибки воспроизведения программы полностью устраняется после одного цикла ее корректировки. В источнике [10] предложено техническое решение ОМ, пригодное для использования в системе с адаптивной корректировкой управляющих программ, а в (11) приведено математическое обоснование этого решения.

Эффективность использования ОМ в цепи адаптации теряется при работе в условиях случайных возмущающих воздействий. Например, если регулярная составляющая отсутствует, а случайная имеется, корректировка программы с выполнением условий (2) и (3) порождает появление регулярной составляющей. Ею становится случайная составляющая, зарегистрированная при предыдущем воспроизведении программы и введенная в дискретный интегратор.

В указанных работах не рассматривался вопрос подстройки коэффициента усиления в случае, когда соотношение между регулярной и случайной составляющими возмущающего воздействия и порождаемые ими ошибки изменяются во времени.

Не предложено и способа экономичного (в смысле количества наблюдений) статистического анализа ошибок предшествующих воспроизведений программы для использования в задаче ускорения сходимости процесса (1).

**Постановка задач.** Для пояснения постановки задач в данной работе на рис.1 приведена структурная схема системы с адаптивной корректировкой управляющих программ. Символами на схеме обозначены: УП – управляющая программа, АТО – автоматизированный технологический объект, ОМ – обратная модель, Д – дискретный интегратор, БСА – блок статистического анализа. Работа системы состоит в следующем. Предполагается, что АТО является односвязным непрерывным объектом, но все приведенные на схеме сигналы рассматриваются в дискретном времени (являются решетчатыми функциями). Управляющая программа  $x(n)$  циклически повторяется и не изменяется от цикла к циклу. Она же служит и для измерения ошибок обработанных деталей. Продолжительность программы –  $N$  тактов дискретного времени. Ошибки могут быть измерены как одновременно с выполнением программы (на прокатном стане), так и в промежутках между циклами (металлорежущие станки).

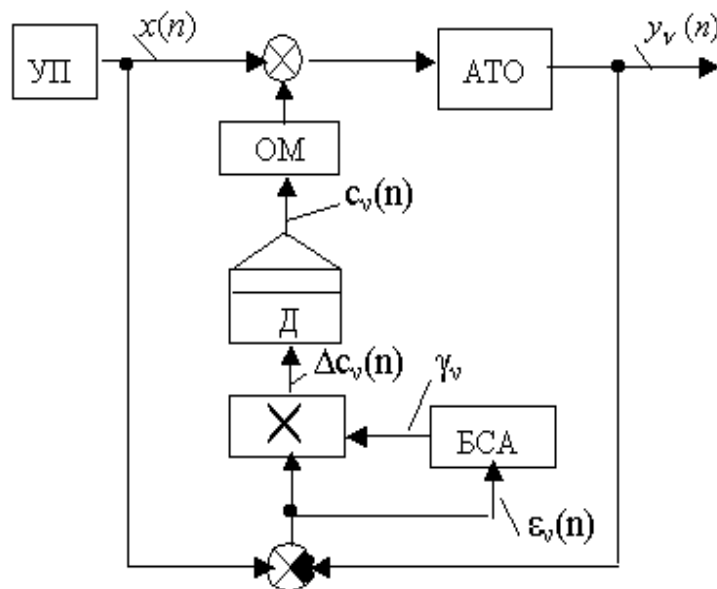


Рис.1. Структурная схема системы

Входящая в систему ОМ выполнена таким образом, что импульсная переходная функция комплекса «ОМ-АТО» удовлетворяет требованиям:

$$k(n) = \begin{cases} 1 & \text{если } n = 1, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

БСА предназначен для нахождения оптимального  $\gamma_v$ , обеспечивающего минимум среднеквадратичной ошибки воспроизведения программы после ее корректировки по результатам анализа ошибок предыдущих воспроизведений.

ОМ, обеспечивающая получение импульсной переходной функции (4) в комплексе «ОМ-АТО», отличается от идеальной временным запаздыванием на один такт дискретного времени. Поэтому зарегистрированный сигнал ошибки подается на вход дискретного интегратора с опережающим временным сдвигом на ту же величину, т.е.

$$\Delta c_{v+1}(n) = \gamma_{v+1} \varepsilon_v(n+1). \quad (5)$$

В дальнейшем будем пользоваться следующим выражением для общей ошибки воспроизведения программы  $\nu$ -го цикла:

$$\varepsilon_{\nu}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n), \quad n \in [0, N], \quad (6)$$

где  $\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)$  и  $\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)$  – соответственно регулярная и случайная составляющие.

В качестве статистических характеристик регулярной и случайной составляющих зарегистрированных ошибок принимаются их среднеквадратичные значения на интервале цикла. Поскольку случайная составляющая принимается аддитивной, между средним квадратом общей ошибки и средними квадратами ее составляющих справедливо соотношение:

$$M \left\{ [\varepsilon_{\nu}(n)]^2 \right\} = M \left\{ [\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)]^2 \right\} + M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)]^2 \right\}, \quad n \in [0, N].$$

Целью работы является нахождение способа определения коэффициента усиления  $\gamma_{\nu+1}$ , обеспечивающего минимум среднеквадратичного значения ошибки последующего воспроизведения программы:  $M \left\{ [\varepsilon_{\nu+1}(n)]^2 \right\} \rightarrow \min$ .

Для достижения этой цели ставятся следующие задачи:

- нахождение зависимости оптимального коэффициента усиления от средних квадратов составляющих ошибки предыдущих воспроизведений программы, т.е. от  $M \left\{ [\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)]^2 \right\}$  и  $M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)]^2 \right\}$ ;

- определение указанных средних квадратов на основании статистического анализа зарегистрированных ошибок двух предыдущих циклов воспроизведения программы.

При решении этих задач принимается, что статистические характеристики регулярной и случайной составляющих ошибки могут изменяться во времени, но настолько медленно, что на протяжении двух соседних циклов являются постоянными.

**Изложение результатов исследования.** Сначала находим выражение для ошибки  $(\nu + 1)$ -го воспроизведения управляющей программы. Оно отличается от выражения (6) из-за введения поправки (5) в дискретный интегратор:

$$\varepsilon_{\nu+1}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu+1}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu+1}(n) + \Delta\varepsilon_{\nu+1}(n), \quad (7)$$

где  $\Delta\varepsilon_{\nu+1}(n)$  — приращение ошибки, порождаемое этой поправкой.

Учитывая, что поправка (5) проходит через систему “ОМ—АТО”, описываемую импульсной переходной функцией (4), и меняет знак в элементе сравнения, для приращения ошибки находим выражение с использованием формулы свертки :

$$\Delta\varepsilon_{\nu+1}(n) = - \sum_{m=0}^n \Delta c_{\nu+1}(n-m)k(m) = -\gamma_{\nu+1}\varepsilon_{\nu}(n) = -\gamma_{\nu+1}\{\bar{\varepsilon}_{\nu}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)\}. \quad (8)$$

В дальнейших выкладках учитываем следующие обстоятельства.

Регулярная составляющая ошибки в соседних циклах воспроизведения программы не успевает измениться, т.е.

$$\bar{\varepsilon}_{\nu+1}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu}(n), \quad (9)$$

а случайная составляющая аддитивна и удовлетворяет требованиям:

$$\tilde{\varepsilon}_{\nu+1}(n) \neq \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n), \quad (10)$$

$$M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_{\nu+1}(n)]^2 \right\} = M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)]^2 \right\}. \quad (11)$$



Выражение для ошибки (7) после преобразований с использованием зависимостей (8, 9, 10) получит вид:

$$\varepsilon_{\nu+1}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu}(n)(1 - \gamma_{\nu+1}) + \tilde{\varepsilon}_{\nu+1}(n) - \gamma_{\nu+1}\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n),$$

а ее средний квадрат на интервале  $[0, N]$  с учетом аддитивности помехи и справедливости выражения (11) :

$$M\{\varepsilon_{\nu+1}(n)^2\} = M\{\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)^2(1 - \gamma_{\nu+1})^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu+1}(n)^2\} + M\{\gamma_{\nu+1}\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\}.$$

Продифференцировав это выражение по  $\gamma_{\nu+1}$ , приравняв производную нулю и решив полученное уравнение, находим выражение для оптимального коэффициента  $\gamma_{\nu+1}$  в функции вероятностных характеристик регулярной и случайной составляющих ошибки управления в предыдущих циклах:

$$\gamma_{\nu+1} = \frac{M\{\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\}}{M\{\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\}}. \quad (12)$$

Таким образом, оптимальный коэффициент усиления в рассматриваемой адаптивной системе равен отношению среднего квадрата регулярной составляющей ошибки к сумме средних квадратов регулярной и случайной составляющих.

Теперь рассмотрим задачу определения численных значений входящих в выражение (12) квадратов при работе адаптивной системы по рис.1. Эта задача выполняется с помощью блока статистического анализа БСА следующим образом.

Регистрируются ошибки двух циклов воспроизведения программы. В промежутках между ними изменения в дискретный интегратор не вносятся. Ошибки имеют вид

$$\varepsilon_{\nu}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n), \quad \varepsilon_{\nu-1}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu-1}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu-1}(n),$$

а между их параметрами справедливы соотношения:

$$\bar{\varepsilon}_{\nu}(n) = \bar{\varepsilon}_{\nu-1}(n), \quad \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n) \neq \tilde{\varepsilon}_{\nu-1}(n), \quad M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} = M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu-1}(n)^2\}.$$

С учетом этих зависимостей формируются сумма и разность зарегистрированных ошибок:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\nu-1}(n) + \varepsilon_{\nu}(n) &= 2\bar{\varepsilon}_{\nu}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n) + \tilde{\varepsilon}_{\nu-1}(n), \\ \varepsilon_{\nu-1}(n) - \varepsilon_{\nu}(n) &= \tilde{\varepsilon}_{\nu}(n) - \tilde{\varepsilon}_{\nu-1}(n), \end{aligned}$$

и вычисляются их средние квадраты:

$$\left. \begin{aligned} M_{+} &= M\{\varepsilon_{\nu-1}(n) + \varepsilon_{\nu}(n)\}^2 = 4M\{\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} + 2M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} \\ M_{-} &= M\{\varepsilon_{\nu-1}(n) - \varepsilon_{\nu}(n)\}^2 = 2M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Решив полученную систему уравнений, находим выражения для средних квадратов регулярной и случайной составляющих ошибки:

$$M\{\bar{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} = \frac{M_{+} - M_{-}}{4}, \quad M\{\tilde{\varepsilon}_{\nu}(n)^2\} = \frac{M_{-}}{2}.$$

Подставив полученные значения средних квадратов в формулу (12), и, используя обозначения  $M_+$  и  $M_-$  из системы (13), приходим к выражению для оптимального коэффициента усиления в адаптивной системе с ОМ:

$$\gamma_{v+1} = \frac{M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n)]^2 \right\} - M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n)]^2 \right\}}{M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n)]^2 \right\} + M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n)]^2 \right\}}. \quad (14)$$

Таким образом, для определения оптимального коэффициента усиления достаточно иметь зарегистрированные ошибки двух циклов воспроизведения программы. В промежутках между этими циклами в дискретный интегратор не вносятся изменения.

**Экспериментальная часть.** Если в двух циклах воспроизведения программы ошибки управления отсутствуют, т.е.  $\varepsilon_{v-1}(n) = \varepsilon_v(n) = 0$ , тогда выражения (12) и (14) превращаются в неопределенность вида  $\frac{0}{0}$ . В этом случае не требуется корректировка

программы и коэффициент усиления должен приниматься равным нулю.

Из анализа формул (12) и (14) следует, что величина получаемого коэффициента усиления может изменяться в пределах от 0 до 1. Это совпадает с полученным в работе [6] результатом. Если в зарегистрированных ошибках управления присутствует только случайная составляющая (т.е.  $M \left\{ [\bar{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = 0$ ), то вычисленный коэффициент усиления равен нулю и процесс адаптации заканчивается без внесения поправки в дискретный интегратор. В случае же присутствия только регулярной составляющей, т.е. при  $M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = 0$ , коэффициент усиления равен единице и процесс адаптации заканчивается после единственного внесения в дискретный интегратор значения зарегистрированной ошибки  $\varepsilon_v(n)$ . Такие ситуации могут возникать как при первых циклах воспроизведения программы, так и при любых последующих.

Если же в ошибках управления имеются одновременно регулярная и случайная составляющие, выполняется процесс адаптации (1) с соблюдением условий сходимости (2,3). При этом обеспечивается оптимальность каждой корректировки программы в смысле минимума среднеквадратичной ошибки.

**Выводы по результатам исследований.** Использование ОМ совместно с предлагаемым способом подстройки коэффициента усиления обеспечивает оптимальную корректировку программы в любых циклах ее воспроизведения. Возмущающие воздействия при этом могут быть как стационарными, так и медленно изменяющимися во времени. Для получения статистических данных об ошибках достаточно проведения двух экспериментальных проигрываний программы.

Эти качества рассматриваемого способа подстройки коэффициента усиления расширяют возможности практического применения адаптивных систем в условиях случайных ошибок измерений. На металлорежущих станках с программным управлением обрабатываются детали сложной формы. Как показано в [12], имеется возможность автоматически измерять их, не снимая со станка после обработки, но при этом существенное значение имеют случайные ошибки измерений. Проблемы случайных ошибок автоматического измерения имеют место и на прокатных станах, где объект во время измерения находится в движении, а на его поверхности имеется окалина.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем автоматизированного проектирования и отладки программ автоматического управления дискретно-непрерывными технологическими процессами.

The problem of definition of an optimum of forcing factor in system with adaptive updating cyclically repeating controlling influences is considered. In a circuit of adaptation the inverse model is used. An object of control is subject of handicaps influences which parameters can be both constant, and changing in time.

1. Перельман И.И. Регулирование по принципу самоустанавливающейся программы // Автоматика и телемеханика. – 1958, №9. – С. 813-823.
2. Кобринский А.Е., Колисков А.Ш., Левковский Е.И., Попов В.Е., Сергеев В.И. Самонастраивающаяся система программного управления станками // Вестник АН СССР. – 1965, №9. – С. 52-57.
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
4. Перельман И.И. Самонастраивающаяся программа как средство для получения заданной реакции на выходе линейного динамического объекта регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1958. – №4. – С.312-320.
5. Андрейчиков Б.И. Динамическая точность систем программного управления станками. – М.: Машиностроение, 1964. – С. 242-267.
6. Перельман И.И. Выбор оптимального коэффициента усиления в системе регулирования по самоустанавливающейся программе // Автоматика и телемеханика. –1959, №2. – С.184-191.
7. Логинов Н.В. Методы стохастической аппроксимации // Автоматика и телемеханика. – 1966, №4. – С. 185-203.
8. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Системы управления с динамическими моделями. Харьков: Основа, 1996.– 212 с.
9. Клименко А.К. О сходимости процессов адаптации в цифровых системах программного управления станками // Сб. «Адаптивные системы управления металлорежущими станками» / Под ред. А.Е. Кобринского, Сер. С-1. — М.: НИИМАШ, 1971.— С.58-67
10. Клименко А.К., Клименко В.Г. Корректирующее устройство. – Авт. свид. СССР №1406563.– Бюллетень изобретений, №24, 1988.
11. Клименко А.К. Обратная модель для решения задач управления и контроля качества / Методы менеджмента качества // Надежность и контроль качества. – 1999 – №8. – С. 32-39.
12. Клименко А.К., Кожушков Н.П. Об автоматическом измерении на станках с программным управлением величин погрешности обработки деталей // В сб. “Числовые системы автоматического управления машинами”. – К.: Техніка, 1975.– С. 83-86.

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВХОДНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИДА КВАДРАТИЧНОЙ ФУНКЦИИ И НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕННЫХ ПОМЕХ

Кучеров Д.П.

**Введение.** Вопросы создания оптимальных по быстродействию систем являются актуальной задачей теории автоматического управления и в настоящее время. В большинстве публикаций, посвященных этой теме, предлагаются подходы, основанные на полной информации об управляемом объекте и отсутствии помех в каналах измерения фазовых координат (см. напр. [1]).

Однако постановка задачи в такой форме не в полной мере отражает ситуацию, с которой приходится сталкиваться при проектировании систем. Как правило, точная математическая модель управляемой системы конструктору неизвестна, условия функционирования могут изменяться, в каналах измерения фазовых координат действуют помехи, стохастическая природа которых неизвестна.

Возможный выход в сложившейся ситуации основывается на адаптивном подходе. Некоторые вопросы применения этого подхода к построению квазиоптимальных по быстродействию систем изложены в [2, 3]. Так, в [2] показано решение задачи синтеза квазиоптимальной по быстродействию системы управления с линейной по неизвестным параметрам разделяющей функцией в условиях нерегулярных, нестохастических помех; в [3] предложен синтез финитного управления объектом, вращающимся в пространстве, разделяющая функция которого существенно нелинейна по неизвестным параметрам. Особенностью решения этих задач есть неизменность входного воздействия, т.е. синтезируемые в работах [2, 3] системы решают задачу стабилизации. Кроме того, алгоритмы, применяемые в [2, 3], обладают низкой скоростью сходимости.

Трудности, возникающие при синтезе следящих систем, связаны не только с реализацией оптимального управления в условиях отсутствия априорной информации о параметрах объекта, входного воздействия с наличием помех в каналах измерения координат, но и с выбором подходящего размера предполагаемой области достижимости вследствие асимметричности линии переключения (см., например, [4, с. 618]). Таким образом, задаваясь произвольным размером области достижимости, квазиоптимальность системы управления не гарантируется.

В работе ставится и решается задача синтеза эффективной адаптивной квазиоптимальной по быстродействию системы, обеспечивающей отработку входного воздействия в виде квадратичной функции за минимально возможное время при отсутствии априорной информации о параметрах объекта, входного воздействия и наличии ограниченных шумов в каналах измерения. Материалы работы существенно опираются на результаты работы [5], в которой предлагается интеграция различных подходов к задаче синтеза квазиоптимальной по быстродействию системы терминального управления в условиях априорной неопределенности.

**Постановка задачи.** Пусть имеется объект, заданный в виде уравнений состояния:

$$\dot{z}_1(t) = z_2(t), \quad \dot{z}_2(t) = ku(t), \quad (1)$$

в которых  $z$  – вектор  $z^T = (z_1, z_2)$  с координатами  $z_1(t) = \beta(t)$ ,  $z_2(t) = d\beta(t)/dt$ ,  $\beta(t)$  – характеризует закон изменения выходной величины;  $k > 0$ ,  $k$  – коэффициент передачи;  $u(t)$  – управляющее воздействие объекта, которое принимает только два возможных значения  $+1$  и  $-1$ . Считается, что параметр  $k$  в уравнениях (1) неизвестен.

Предполагается, что имеется некоторое задающее воздействие  $\alpha(t)$ , которое представляет гладкую непрерывную функцию времени и может быть аппроксимировано функцией

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2, \quad (2)$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  – в каждом отдельном процессе постоянные величины. Считается, что сигналы  $z_1(t), z_2(t)$  и  $\alpha(t), d\alpha(t)/dt, d^2\alpha(t)/dt^2$  измеряются с помехами

$$z'_1(t) = z_1(t) + \xi_1(t), \quad z'_2(t) = z_2(t) + \xi_2(t), \quad (3)$$

$$\alpha'(t) = \alpha(t) + \zeta_1(t), \quad \dot{\alpha}'(t) = \dot{\alpha}(t) + \zeta_2(t), \quad \ddot{\alpha}'(t) = \ddot{\alpha}(t) + \zeta_3(t), \quad (4)$$

где  $|\xi_1(t)| \leq N_1, |\xi_2(t)| \leq N_2, |\zeta_1(t)| \leq N_1, |\zeta_2(t)| \leq N_2, |\zeta_3(t)| \leq N_3$ , уровни помех  $N_1, N_2, N_3$  априори известны, как и в [2], при чем уровни  $N_1, N_2, N_3$  такие, что  $N_1 \geq N_3, N_2 \geq N_3$ .

Воздействие  $\alpha(t)$  считается допустимым, если выполняется условие

$$\left| \frac{d^2 \alpha'(t)}{dt^2} \right| < k \quad |u(t)| = M. \quad (5)$$

Условие (5) предполагает, что точка  $z$  способна "догнать" точку  $\alpha$ .

Задача состоит в том, чтобы разработать методику синтеза квазиоптимальной по быстродействию следящей системы, воспроизводящей квадратичное воздействие  $\alpha(t)$  для случая, когда параметры динамической системы (2) неизвестны, в каналах измерения координат системы присутствуют помехи, затраты на настройку неизвестных параметров регулятора должны быть по возможности малыми.

**Синтез квазиоптимальной по быстродействию следящей системы.** Сделаем предположение на некоторое время о том, что известно значение параметра  $\hat{k} = k + \delta$  в уравнениях (1), где  $\delta \geq 0$ . Для этого случая вместо уравнений (1) воспользуемся уравнениями состояния относительно ошибки

$$\dot{\theta}_1(t) = \theta_2(t), \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_2(t) = 2\alpha_2 - \hat{k}u(t),$$

$$(\theta_1(0), \theta_2(0)) \in \mathfrak{R}^2,$$

$$(\theta_1(T), \theta_2(T)) \in \Omega \subset \mathfrak{R}^2,$$

где  $\theta_1(t) = \theta(t) = \alpha(t) - \beta(t)$  – ошибка следящей системы,  $T$  – время регулирования, априори неизвестное,  $\Omega$  – область достижимости, которая определяется далее.

Введем в рассмотрение вектор  $v^T(t) = (v_1(t), v_2(t))$ ,  $v(t) \in V$ , где

$$V = \{(v_1, v_2) : v_1(0) \leq v_1 \leq \bar{v}_1(0), v_2(0) \leq v_2 \leq \bar{v}_2(0)\}. \quad (7)$$

Следуя [2, 3], закон управления (уравнение регулятора) следящей системы выберем в форме

$$u(t) = \begin{cases} +1, & \text{если } f(d, v''(t-0)) > 0, \\ -1, & \text{если } f(d, v''(t-0)) < 0, \\ u(t-0), & \text{если } f(d, v''(t-0)) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$f(d^T, v'') = d^T v''. \quad (9)$$

Выражение (9) определяет уравнение линии переключения, в котором  $d^T = (d_1, d_2)$ ,  $v'' = (v''_1, v''_2)^T$  – векторы, компоненты которых определяются следующим образом

$$\tilde{d}^{(i)} = \lambda(d^{(i)} - \delta_i). \quad (10)$$

Здесь  $\lambda > 0$  – произвольное положительное число,

$$d_1 = \frac{M}{k} - \text{sign}(\theta_2) \quad d_2 = \frac{1}{2k}; \quad (11)$$

$$v_0^{(1)} = -\theta_1'(0), \quad v_0^{(2)} = -\theta_2'(0) | \theta_2'(0) |, \quad (12)$$

при  $t=0$  и

$$v''(t) = \begin{cases} \theta'(t-0) - \Delta & \text{при } f(d^T, v''(t-0)) > 0, \\ \theta'(t-0) + \Delta & \text{при } f(d^T, v''(t-0)) < 0, \\ \theta'(t-0) & \text{при } f(d^T, v''(t-0)) = 0; \end{cases} \quad (13)$$

при  $t > 0$ , где  $\Delta^T = (\Delta_1, \Delta_2)$ ;

$$\theta_1'(t) = \theta_1(t) + \chi_1(t), \quad \theta_2'(t) = \theta_2(t) + \chi_2(t) \quad (14)$$

где  $|\chi_1(t)| \leq |\xi_1(t) + \zeta_1(t)| \leq 2N_1 = \Delta_1$ ,  $|\chi_2(t)| \leq |\xi_2(t) + \zeta_2(t)| \leq 2N_2 = \Delta_2$ .

*Замечание 1.* Система уравнений состояния (6) имеет порядок  $n=2$  и нулевые собственные значения. В соответствии с теоремой "об  $n$  интервалах" оптимальное по быстродействию управление (8) для уравнений (6) имеет не более, чем два интервала. Кроме того, система уравнений (6) линейна по  $u(t)$  и управляющее воздействие  $u(t)$  на каждом интервале управления принимает свое предельное значение, следовательно, закон управления (8) удовлетворяет принципу максимума, а значит, является оптимальным законом управления. Время регулирования  $T$  считается минимально возможным, если регулятор, реализующий закон управления (8), обеспечивает перемещение вектора  $v''(t)$  в некоторую окрестность начала координат  $\Omega \in V \setminus v(0)$  такую, что при  $\delta \rightarrow 0$  окрестность  $\Omega$  стягивается в начало координат. Такой регулятор, обеспечивающий перемещение вектора  $v(t)$  из произвольного начального состояния  $v(0)$  в  $\Omega$  не более, чем за два интервала управления, будем называть квазиоптимальным, а  $\Omega$  – областью достижимости.

Наличие шумов в каналах измерения координат позволяет сделать утверждение, что все точки  $v(0)$  фазовой плоскости  $V$  будут переводиться в некоторую окрестность  $\Omega$ , которая не может быть произвольно малой. Размеры этой области в значительной степени будут определяться уровнями шумов  $N_1, N_2, N_3$ , величиной  $\delta$ , а также зависят от начальных условий  $v(0)$ . Естественно предположить, что если  $N_1 \rightarrow 0, N_2 \rightarrow 0, N_3 \rightarrow 0$  и  $\delta \rightarrow 0$ , то и  $\Omega \rightarrow 0$ .

Соотношение (13) совместно с (8) реализует своеобразную переключательную функцию  $\text{sign}f(d, v)$  с гистерезисом, "ширина гистерезиса" выбрана так, чтобы обеспечить выполнение неравенства  $2|\Delta_i| \geq \max_t |\chi_i(t)|$  ( $i=1, 2$ ) на интервале  $0 < t \leq T$ . Введение гистерезиса в переключательную функцию необходимо для исключения ложных переключений управления  $u(t)$  (см., например, [2, 3]) при движении вдоль линии переключения. Таким образом, имеет место следующая

**Теорема.** Пусть имеется объект вида (1), которому ставится задача воспроизвести задающее воздействие вида (2), тогда закон оптимального управления в форме (8) обеспечивает перемещение вектора координат  $v(t)$  объекта (1) из произвольного начального состояния  $v(0)$  в область  $\Omega \in V \setminus v(0)$  не более, чем за два интервала управления. Область  $\Omega$  определяется объединением областей  $S^+, S^-$ , т.е.

$$\Omega = S^+ \cup S^-, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} S^+ &= \{w^{(i)} : w^{(i)} \leq 0, (\underline{w}(v(0)), w) \geq \underline{w}_1(v(0))\underline{w}_2(v(0))\}, \\ S^- &= \{w^{(i)} : w^{(i)} \geq 0, (\overline{w}(v(0)), w) \leq \overline{w}_1(v(0))\overline{w}_2(v(0))\}. \end{aligned} \quad (16)$$

В (16) введены следующие обозначения  $w^T = (w^{(1)}, w^{(2)})$ ,  $\bar{w}^T = (\bar{w}_1, \bar{w}_2)$ ,  $\underline{w}^T = (-w_1, w_2)$ ,  $i=1, 2$ ; тогда компоненты векторов  $\underline{w}$ ,  $\bar{w}$  с учетом (6) в силу (5) имеют вид

$$\underline{w}^{(1)} = -\Delta_1 + \frac{d_2 \Delta_2^2}{d_1''} - A^2 \frac{d_1'' \delta_1 + d_2 \delta_2}{d_1''(d_1'' + \delta_2)}, \quad (17)$$

$$\underline{w}^{(2)} = -\Delta_2 - \sqrt{A^2 \frac{d_2'' \delta_1 + d_2 \delta_2}{d_2(d_1'' + \delta_2)} + \frac{d_1''}{d_2} \Delta_1}, \quad (18)$$

$$\bar{w}^{(1)} = \Delta_1 + \frac{d_2}{d_1'} \Delta_2^2 - A^2 \frac{d_1' \delta_1 - d_2 \delta_2}{d_1'(d_1' - \delta_2)}, \quad (19)$$

$$\bar{w}^{(2)} = \Delta_2 + \sqrt{A^2 \frac{d_1' \delta_1 - d_2 \delta_2}{d_2(d_1' - \delta_2)} + \frac{d_1'}{d_2} \Delta_1}, \quad (20)$$

где  $A$  – есть решение уравнения  $A^2 - 2lA + m = 0$ , в котором для уравнений (17), (18) коэффициенты  $l, m$  имеют вид

$$l = \frac{\Delta_2 d_2 (d_1'' + \delta_2)}{2d_2 - d_1' \delta_1 + d_2 \delta_2}, \quad (21)$$

$$m = \frac{(d_1'' - \delta_2)[d_2(v_2(0) - \Delta_2^2) - d_1'(v_1(0) - \Delta_1)]}{2d_2 + d_1' \delta_1 - d_2 \delta_2}, \quad (22)$$

а для уравнений (19), (20)

$$l = -\frac{\Delta_2 d_2 (d_1' - \delta_2)}{d_1'' \delta_1 - d_2 \delta_2 - 2d_2}, \quad (23)$$

$$m = \frac{(d_1' - \delta_2)(d_1''(v_1(0) - \Delta_1) - d_2(v_2(0) - \Delta_2^2))}{d_1'' \delta_1 - d_2 \delta_2 - 2d_2}. \quad (24)$$

*Доказательство* существенно опирается на результаты работы [4]; ввиду ограниченного объема статьи здесь не приводится.

*Замечание 2.* Закон управления (8) такой же, как и предложенный в [2, 3] ранее для системы работающей в режиме стабилизации, т.е. когда  $\alpha(t) = \text{const}$ . В отличие от результатов работы [2, 3] область достижимости  $\Omega$ , определяемая выражениями (17)-(20), не является симметричной относительно начала координат, что связано с необходимостью "догона" встречной (область (17), (18)) или убегающей (область (19), (20)) точки  $\alpha(t)$ . Область  $\Omega$  "стягивается" в начало координат при отсутствии шумов  $\xi^{(i)}(t)$ ,  $\zeta^{(i)}(t)$  и точном знании параметров  $d^{(i)}$  в законе управления (8), т.е. при  $\Delta_1 \rightarrow 0$ ,  $\Delta_2 \rightarrow 0$  и  $\delta \rightarrow 0$  область  $\Omega \rightarrow 0$ , как и должно быть.

**Алгоритм адаптации.** Предположим теперь, что параметр  $\hat{k}$  неизвестен. В этом случае закон управления будем строить по схеме (8) с учетом (9)-(13), заменяя в соответствующих выражениях неизвестный вектор  $\hat{d}$  его подходящей оценкой  $\hat{d}_n$ , которая определяется на каждом  $(n-1)$ -м цикле перемещения вектора  $v''(t)$  из начального  $v''(0)$  в некоторое конечное положение.

Между тем, для построения алгоритма определения  $\hat{d}_n$  необходимо знание размера области  $\Omega$ , определяемой параметрами  $\underline{w}$ ,  $\bar{w}$ , которые априори неизвестны, поскольку неизвестен вектор  $d$ . Вторая проблема, которая сразу же возникает, если область  $\Omega$  определена каким-либо образом, это вопрос фиксации факта попадания (или не попадания)  $v(t)$  в  $\Omega$ , ведь вектор  $v(t)$  недоступен для измерения.

Чтобы обойти упомянутые затруднения, попытаемся оценить наибольший размер области  $\Omega_m$  при всех допустимых значениях  $d$ . В силу линейной зависимости выражений (17) — (20) с учетом (21)–(24) заключаем, что размер этой области находится как

$$\Omega_m = S_m^+ \cup S_m^-, \quad (25)$$

где параметры  $S_m^+$  и  $S_m^-$  определяются с учетом границ области  $V$ , получаемых заменой в (22) и (24) значений  $v(0)$  на  $\underline{v}(0)$  или  $\bar{v}(0)$

$$\begin{aligned} S_m^+ &= \left\{ w^{(i)} : w^{(i)} \leq 0, (\underline{w}(\bar{v}(0)), w) \geq \underline{w}_1(\bar{v}(0))\underline{w}_2(\bar{v}(0)) \right\}, \\ S_m^- &= \left\{ w^{(i)} : w^{(i)} \geq 0, (\bar{w}(\underline{v}(0)), w) \leq \bar{w}_1(\underline{v}(0))\bar{w}_2(\underline{v}(0)) \right\}. \end{aligned} \quad (26)$$

Следует заметить, что заключение о попадании точки  $v''(t)$  в область  $\Omega_m$ , при любом максимальном размере  $\Omega_m$ , сделать невозможно, так как в  $\Omega_m$  фиксируется не истинный вектор  $v(t)$ , а измеренный  $v'(t)$ . При этом вовсе не гарантируется существование такого случая, что вектор  $v'(t)$  находится в области  $\Omega_m$ , а вектор  $v(t)$  вне ее при любом размере  $\Omega_m$ .

Для фиксации попадания фазовой точки  $v(t)$  в  $\Omega_m$  воспользуемся результатом работы [6], где предложено попадание в область  $\Omega_m$  регистрировать по факту наличия участка траектории в области  $\Omega_m$ . Таким образом, если существуют такие моменты  $t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, \dots$ , что  $v'(t_i) \in \Omega_m, v'(t_{i+1}) \in \Omega_m, v'(t_{i+2}) \in \Omega_m, \dots$ , то принимается решение о достижении объектом цели управления.

Теперь сформулируем алгоритм адаптации. Этот алгоритм предусматривает запоминание координаты точки пересечения траекторией движения  $v'(t_n)$  разделяющей поверхности  $f_n(\hat{d}_n, v'') = 0$  в первый раз. Обозначим через  $l(t_n)$  общее число переключений к текущему моменту  $t_n$  времени, начиная с момента  $t=0$ , тогда алгоритм адаптации строится в форме следующей рекуррентной процедуры:

$$\hat{d}_n = \begin{cases} \hat{d}_{n-1}, & \text{если } \|v'(t_n)\| \leq \varepsilon, \text{ т.е. вектор } v''(t_n) \text{ попадает в область } \Omega_m \\ & \text{с однократным переключением } u(t); \\ \text{Pr}_{\Xi} \{ \hat{d}_{n-1} + v''(t_n) \}, & \text{если } l(t_n) \geq 2 \text{ при } \hat{d}_{n-1}^T v''(t_n - 0) \leq 0 \text{ или если} \\ & \hat{d}_{n-1}^T v''(t_n - 0) < 0 \text{ и вектор } v''(t_n) \text{ не попадает в область } \Omega_m \text{ с} \\ & \text{однократным переключением } u(t); \\ \text{Pr}_{\Xi} \{ \hat{d}_{n-1} - v''(t_n) \}, & \text{если } \hat{d}_{n-1}^T v''(t_n - 0) \geq 0 \text{ и вектор } v''(t_n) \text{ не} \\ & \text{попадает в область } \Omega_m \text{ с однократным переключением } u(t) \\ & \text{или если } l(t_n) \geq 2 \text{ при } \hat{d}_{n-1}^T v''(t_n - 0) > 0. \end{cases} \quad (27)$$

Здесь  $\text{Pr}_{\Xi} \{ \cdot \}$  обозначает операцию проектирования вектора  $\hat{d}$  в область  $\Xi = [\underline{d}^{(1)}, +\infty) \times [\underline{d}^{(2)}, +\infty)$ .

Исследование свойств алгоритма (27) для других объектов в [2, 3, 6] показывает, что скорость сходимости существенно зависит от выбора начального значения вектора  $\hat{d}_0$ . Повысить скорость сходимости алгоритма (27) удастся применением идентификационного подхода, идея которого предлагалась в [5].

**Алгоритм идентификации.** Как и [5, 6], воспользуемся процедурой точечного оценивания, предполагающей принудительную периодическую дискретизацию сигналов  $u(t), v_1(t), v_2(t)$ . Для этого неизвестные компоненты вектора  $\hat{d}$  определим идентификацией параметров дискретных моделей, соответствующих уравнениям (7), в форме



$$\theta_1[j] - 2\theta_1[j-1] + \theta_1[j-2] = \tau_1(u[j-1] - u[j-2]) + \xi_j^{(1)}, \quad (28)$$

$$\theta_2[j] - \theta_2[j-1] = \tau_2 u[j-1] + \xi_j^{(2)}. \quad (29)$$

Здесь  $\tau_1, \tau_2$  – неизвестные величины, связанные с параметрами системы и периодом  $T$  квантования сигналов  $\theta_1, \theta_2$  по времени соотношениями

$$\tau_1 = \frac{kT^2}{2} \left( \frac{M}{k} - \text{sign}\theta_2 \right), \quad \tau_2 = kT, \quad (30)$$

а  $\xi_j^{(1)}, \xi_j^{(2)}$  — приведенные к выходам интеграторов помехи измерения в каждый  $j$ -й дискретный момент времени, обладающие (в силу ограничений  $|\xi^{(1)}(t)| < \Delta_1, |\xi^{(2)}(t)| < \Delta_2$ ) свойствами  $|o_j^{(1)}| \leq 4\Delta_1, |o_j^{(2)}| \leq 2\Delta_2$ . Следует отметить, что уравнения (28), (29) справедливы только для тех интервалов дискретности, когда управление  $u(t)$  остается неизменным, т.е. для всех  $t \in [(j-2)T, jT]$ .

В качестве алгоритма получения точечных оценок неизвестных  $\tau_1[j], \tau_2[j]$  в (28), (29) возьмем идентификационную процедуру вида

$$\tau_1^{(i)}[j] = \begin{cases} \tau_1^{(i)}[j-1], & \text{если } |\varepsilon[j]| \leq 4\Delta_1, \\ \tau_1^{(i)}[j-1] - \gamma[j] \frac{\varepsilon[j] - 4\Delta_1 \text{sign } \varepsilon[j]}{u[j-1] + u[j-2]}, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (31)$$

$$\tau_2[j] = \begin{cases} \tau_2[j-1], & \text{если } |\varepsilon_1[j]| \leq 2\Delta_2, \\ \tau_2[j-1] - \gamma[j] \frac{\varepsilon_1[j] - 2\Delta_2 \text{sign } \varepsilon_1[j]}{u[j-1]}, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (32)$$

где  $\varepsilon[j] = \tau_1(u[j-1] + u[j-2]) - \theta_1[j] + 2\theta_1[j-1] - \theta_1[j-2]$ ,  $\varepsilon_1[j] = \tau_2 u[j-1] - \theta_2[j] + \theta_2[j-1]$  – ошибки идентификации моделей (28), (29);  $\gamma[j]$  – свободный параметр, выбираемый из условия  $0 < \gamma' \leq \gamma[j] \leq \gamma'' < 2$  таким образом, чтобы выполнить требование  $\tau_1[j] > 0, \tau_2[j] > 0$ ; вектор  $\tau[0]$  может принимать произвольное значение.

Процедура (31), (32) представляет собой рекуррентный алгоритм решения неравенств (см., например, "Полоска-1" [7])

$$\left| \widehat{\tau}_1(u_{j-1} + u_{j-2}) - \theta_1[j] + 2\theta_1[j-1] - \theta_1[j-2] \right| \leq 4\Delta_1 \quad (33)$$

$$\left| u[j-1]\tau_2 - \theta_2[j] + \theta_2[j-1] \right| \leq 2\Delta_2 \quad (34)$$

относительно неизвестных  $\widehat{\tau}_1, \widehat{\tau}_2$ . Неравенства (33), (34) получаются прямо на основании (28), (29) с учетом ограничений  $|o_1(t)| \leq 4\Delta_1, |o_2(t)| \leq 2\Delta_2$ .

Переход от оценок  $\widehat{\tau}_i$ , полученных с помощью процедур идентификации (31), (32), к оценкам вектора  $\widehat{d}_i$  алгоритма адаптации (28) осуществляется по уравнениям связи

$$d_1 = \frac{2\tau_1}{\tau_2 T}, \quad d_2 = \frac{T}{\tau_2}, \quad (35)$$

$$\tau_1 = \frac{d_1}{2d_2} T^2, \quad \tau_2 = \frac{T}{d_2}. \quad (36)$$

**Методика.** Предлагаемая методика заключается в следующем:

1. Для объекта (1) предварительно устанавливаются исходные данные: начальные условия  $v(0)$ , начальный вектор  $\hat{d}_0$ , область  $\Omega_m$ .

2. Осуществляется прогон системы, в процессе которого вектор  $\hat{d}_0$  корректируется с помощью процедур идентификации (31), (32).

3. Проверяется выполнение условий квазиоптимальности (попадание в область  $\Omega_m$  не более, чем за два интервала управления), в случае необходимости осуществляется коррекция  $\hat{d}_{i-1}$  с помощью процедуры адаптации (27).

4. Устанавливается новое значение  $\hat{d}_i$  и осуществляется очередной прогон следящей системы.

**Результаты моделирования.** Эффективность предлагаемой методики проводилось моделированием адаптивного регулятора (8), (9), (27), (31), (32) при воспроизведении воздействия  $\alpha(t)=t^2$  объектом (1) с параметром  $k=3 \text{ c}^{-2}$ , при различных начальных условиях  $v^T(0)=\{z_1(0), z_2(0)\}$ . Предварительно установлено, что объект (1) из начального состояния  $v^T(0)=(-5, 0)$  перемещается за два интервала управления в начало координат за время  $t_{opt}=3,54 \text{ c}$ , считающееся оптимальным, с оптимальным  $d_{opt}=(2,33, 0,167)$  и в отсутствии помех.

При наличии помех  $\xi_1(t), \xi_2(t)$ , действующих по каналам измерения фазовых координат, объект (1) удаётся перевести в область  $\Omega$  также за два интервала управления, время регулирования становится равным  $t^*_{opt}=3,62 \text{ c}$ , параметры области  $S^+ \subset \Omega$  рассчитаны в условиях решения задачи по формулам (19), (20) и равны  $S^+=(0,34, 1,07)$ .

Далее проводилась оценка эффективности предлагаемого алгоритма адаптации. Выбирался произвольным образом начальный вектор  $d_0$ , например,  $d_0^T=(1,0, 1,0)$ . При тех же начальных условиях алгоритмом адаптации (28) за  $n=13$  циклов испытаний получен вектор  $d_{13}^T=(23,97, 2,37)$ , при котором в следящей системе реализуется квазиоптимальный по быстродействию процесс. Применение алгоритма обучения (27) совместно с процедурами точечной идентификации (31), (32) позволило за  $n=3$  цикла испытаний получить вектор настроечных параметров  $d_3^T=(212,93, 8,87)$ .

Результаты моделирования приведены на рис. 1-3. Рис. 1 показывает динамику системы во временной плоскости на первом, а рис. 2 на последнем цикле испытаний. На рисунках использованы обозначения  $\theta(t)$  – ошибка следящей системы,  $\dot{\theta}(t)$  – ее производная,  $u(t)$  – управляющее воздействие,  $\alpha(t)$  – задающее воздействие,  $\beta(t)$  – выходная величина.

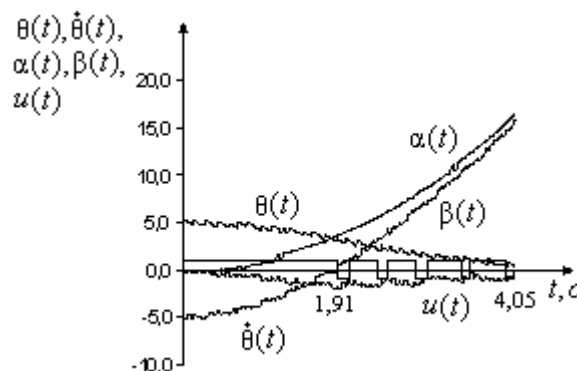


Рис.1 Переменные  $\alpha(t), \beta(t), \theta(t), \dot{\theta}(t)$  и управление  $u(t)$  на первом цикле

Из рис.1 видно, что для воспроизведения воздействия  $\alpha(t)$  с заданной точностью следящей системе при произвольно выбранном векторе  $d_0$  понадобилось 10 интервалов управления  $u(t)$ , что привело к увеличению времени регулирования на 12 % (по сравнению с оптимальным). После выполнения алгоритма адаптации в следящей системе устанавли-

ваются квазиоптимальный по быстродействию процесс, т.е. заданная ошибка слежения, определяемая областью  $S^+$ , устанавливается за два интервала управления (см. рис.2), проигрыш во времени регулирования не превышает 2,4 %. Применение процедуры точечной идентификации позволило сократить общее время адаптации в 6 раз.

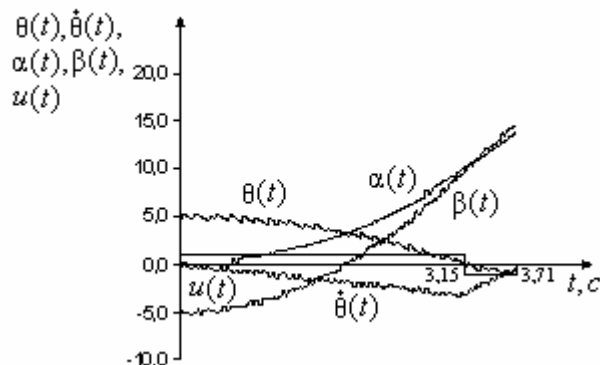


Рис. 2 Переменные  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $\dot{\theta}(t)$ ,  $u(t)$  после окончания процесса адаптации

Сходимость алгоритма (27), (31), (32) оценивалась функцией

$$W_n = \sum_{i=1}^2 (\lambda d_{opt}^{(i)} - d_n^{(i)})^2, \quad (37)$$

где коэффициент  $\lambda$  выбирался равным  $\lambda=10000$ . Вид функции  $W_n$  показан на рис.3, ее убывающий характер свидетельствует о сходимости процесса адаптации.

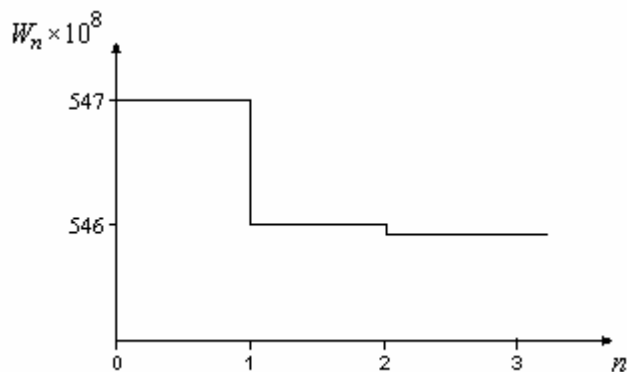


Рис. 3 Функция  $W_n$

### Выводы

1. Сходимость предлагаемого алгоритма адаптивной квазиоптимальной по быстродействию следящей системы, которая воспроизводит квадратичное воздействие, существенно зависит от выбора начальной оценки вектора  $d_0$ .
  2. Совместное использование алгоритмов точечной идентификации и обучения позволяет улучшить показатели процесса адаптации, а именно повысить скорость его сходимости.
  3. Квазиоптимальный по быстродействию процесс в следящей системе возможен после окончания процесса адаптации.
1. Предполагается, что дальнейшие исследования будут направлены на изучение функционирования адаптивного регулятора для объектов более высокого порядка.

The technique of synthesizing of adaptive time-quasioptimal of a servo-mechanism is offered. A feature of a technique is the application of a procedure of tutoring of a pattern recognition together with a procedure of a dot estimation. The considered approach allows considerably to increase efficiency of a procedure of adaptation.

1. Крутько П.Д. Исследование динамики субоптимальных по быстродействию автоматических систем // Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 2004. - № 2. - С. 16-33.

2. Кучеров Д.П. Решение одной задачи синтеза адаптивной системы управления, квазиоптимальной по быстродействию, при наличии ограниченного шума // Кибернетика и вычисл. техника. – 1999. – Вып. 122. – С. 13 – 22.

3. Кучеров Д.П. Синтез адаптивного регулятора для финитного управления вращающимся телом при наличии ограниченных помех // Проблемы управления и информатики. – 2005. - № 1. – С. 38-48.

4. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. – М.: Наука, 1971. – 744 с.

5. Кучеров Д.П., Скурихин В.И., Житецкий Л.С. Интеграция информационных технологий при обучении принятию решений в задачах терминального управления // УСИМ. – 2003. - № 5. – С. 30-41.

6. Кучеров Д.П. Алгоритм адаптивного терминального управления одним неминимально-фазовым объектом в условиях ограниченных помех // Вестник Харьковского НТУ "ХПИ". – 2005. – №55. – С. 121-126.

7. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 441 с.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 531.7

### ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ РУХУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Іволгіна Т.О.

#### Вступ

Застосування прямого методу Ляпунова для аналізу стійкості руху динамічних систем дозволяє значно розширити область застосування аналітичних методів дослідження. Задача ускладнюється відсутністю загального способу побудови функції Ляпунова.

Сам А. М. Ляпунов і багато його послідовників для вирішення окремих задач в якості функції Ляпунова часто застосовували математичне вираження повної і кінетичної енергії динамічної системи [2 - 4].

При матрично-векторному трактуванні диференціальних рівнянь узагальнених сил [5-7] методи аналізу процесу перетворення енергії не потрапили до поля зору дослідників. Застосування математичного вираження приросту повної енергії при відхиленні руху динамічної системи від незбуреного до цього часу не розглядалося. Вираз для оцінки повної енергії динамічної системи задовольняє вимогам, що пред'являються до функції Ляпунова, в тому випадку, коли в якості незбуреного руху прийнято стан спокою в початку координат, відносно яких описується рух динамічної системи.

В якості початкових даних в теорії стійкості руху використовуються рівняння збуреного руху, які є математичною моделлю досліджуваної динамічної системи на збуреннях, тобто відхиленнях узагальнених координат від їх значень при незбуреному русі.

#### Постановка задачі

Побудуємо функцію Ляпунова на основі системи звичайних диференціальних рівнянь з дійсними коефіцієнтами шляхом проведення певної послідовності перетворень.

При складанні диференціальних рівнянь за аргументи виберемо параметри, які однозначно визначають стан системи. За аналогією з теоретичною механікою при аналізі руху, описуваного диференціальними рівняннями, можуть бути використані поняття узагальнених координат і узагальнених сил. Тоді доданки рівнянь сприйматимуться як математичні вирази узагальнених сил, тобто як величини, рівні коефіцієнтам при приростах узагальнених координат у виразах повної елементарної роботи діючих на систему сил [1].

#### Розв'язання задачі

Для динамічної системи, що має  $s$  ступенів свободи, система рівнянь збуреного руху має наступний вигляд:

$$\sum_{i=0}^{n_k} a_{ki} x_k^i = 0; \quad i = I, II, \dots, n_k; \quad k = 1, 2, \dots, s, \quad (1)$$

де  $a_{ki}$  - дійсні коефіцієнти пропорційності між значенням узагальненої сили та  $i$ -ї

похідної відхилення, що є функціями часу та відхилення;  $x_k^i$  -  $i$ -та похідна відхилення по  $k$ -й узагальненій координаті.

Рівняння (1) є однорідними, так як ними описується вільний рух системи із збуреного стану, що визначається початковими відхиленнями від незбуреного  $(x_{k0}, x_{k0}^1, \dots, x_{k0}^{n_k})$ .

Кількість енергії, що затрачується динамічною системою при переході з незбуреного стану у збурений, може бути визначена почленним інтегруванням рівняння (1) в межах від  $x_k = 0$  до  $x_{k0}$ , якщо в праву частину рівняння підставити значення збурюючої  $F_k$ . Інтегрування доцільно виконувати по часу, замінивши  $dx$  на  $x^I dt$  та межі інтегрування: нижню – на  $t_0$ , коли система знаходиться у незбуреному стані  $x_k^i(t_0) = 0$ , верхню – на  $t_1$ , коли система знаходиться в початкових умовах та збурююча дія припинилась ( $F_k = 0$ ). Тоді рівняння роботи узагальнених сил прийме вигляд

$$A_F = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=0}^{n_k} a_{ki} x_k^i x_k^I dt = \int_{t_0}^{t_1} F_k x_k^I dt. \quad (2)$$

Кількість енергії, перетвореної в процесі цього руху, рівна роботі внутрішніх сил динамічної системи.

Структуру енергетичних потоків і узагальнених сил, що беруть участь в їх утворенні, можна простежити на прикладі диференціального рівняння  $n$ -го порядку, опустивши індекс  $k$ , що відповідає номеру ступеня вільності.

Робота, виконувана потенціальними силами динамічної системи,

$$A_0 = \int_{t_0}^{t_1} a_0 x x^I dt = \frac{1}{2} a_0 x x_0^2. \quad (3)$$

Енергія, перетворена в результаті роботи потенціальних сил, затрачена на зміну потенціальної енергії динамічної системи. Приріст енергії залежить лише від значення відхилення і не залежить від тривалості інтервалу інтегрування.

Кількість енергії, перетвореної силою, яка пропорційна першій похідній відхилення,

$$A_1 = \int_{t_0}^{t_1} a_1 (x^I)^2 dt. \quad (4)$$

Напрямок потоку енергії, перетворюваної за рахунок роботи цієї сили, залежить від знаку коефіцієнта  $a_1$ , тобто від властивостей динамічної системи і тривалості інтервалу інтегрування, але не залежить від напряму швидкості. Енергія або розсіюється дисипативними силами, або вводиться в сферу перетворення силами прискорюючими, а потім акумулюється у вигляді приросту повної енергії.

Кількість енергії, перетвореної кінетичною силою, пропорційною другій похідній відхилення за часом, визначається рівнянням

$$A_2 = \int_{t_0}^{t_1} a_2 x'' x^I dt = \frac{1}{2} a_2 (x^I)^2_{t_0}^{t_1} = \frac{1}{2} a_2 (x_0^I)^2. \quad (5)$$

Ця енергія затрачується на зміну кінетичної складової повної енергії динамічної системи.

Кількість енергії, перетвореної силою, пропорційною третій похідній відхилення,

$$A_3 = A_3' + A_3'' = \int_{t_0}^{t_1} a_3 x''' x^I dt = a_3 x'' x^I_{t_0}^{t_1} - a_3 \int_{t_0}^{t_1} (x'')^2 dt. \quad (6)$$

Енергія, перетворена за рахунок роботи цієї сили, частково затрачується на утворення приросту повної енергії ( $A_3'$ ) динамічної системи і частково ( $A_3''$ ) розсіюється або вводиться в сферу перетворення в залежності від знаку коефіцієнта  $a_3$ .

Інтегруючи рівняння (2), що містить похідні відхилення більш високого порядку, одержимо вирази, що ілюструють роль цих узагальнених сил в процесі перетворення енергії:

$$A_4 = \int_{t_0}^{t_1} a_4 x^{IV} x^I dt = a_4 x^{III} x^I \Big|_{t_0}^{t_1} - \frac{1}{2} a_4 (x^{II})^2 \Big|_{t_0}^{t_1}; \quad (7)$$

$$A_5 = A_5' + A_5'' = \int_{t_0}^{t_1} a_5 x^V x^I dt = a_5 (x^{IV} x^I - x^{III} x^{II}) \Big|_{t_0}^{t_1} + \int_{t_0}^{t_1} a_5 (x^{III})^2 dt. \quad (8)$$

$$A_6 = \int_{t_0}^{t_1} a_6 x^{VI} x^I dt = a_6 [(x^V x^I - x^{IV} x^{II} + \frac{1}{2} (x^{III})^2)] \Big|_{t_0}^{t_1}. \quad (9)$$

Доданки рівняння роботи внутрішніх сил динамічної системи можуть бути розділені – за роллю в процесі перетворення енергії – на дві групи: 1) доданки, абсолютна величина яких не залежить від тривалості інтервалу інтегрування, що визначають приріст повної енергії динамічної системи; 2) доданки, абсолютна величина яких залежить від тривалості інтервалу інтегрування, що визначають разом з роботою збурюючої дії, енергетичний зв'язок системи з оточуючою середою.

Підставимо вирази (3) – (9) в рівняння (2), розмістивши в лівій частині доданки першої групи, а в правій – другої:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} a_0 x_0^2 + \frac{1}{2} a_2 (x_0^I)^2 + \frac{1}{2} a_3 x_0^{II} x_0^I + a_4 [x_0^{II} x_0^I - \frac{1}{2} (x_0^I)^2] + a_5 (x_0^{IV} x_0^I - x_0^{III} x_0^{II}) + \dots = \\ = A_F - A_1 + A_3'' - A_5'' + \dots = V(t_1), \end{aligned}$$

де  $V(t_1)$  - приріст повної енергії динамічної системи, одержаний при початкових умовах збуреної дії.

Аналогічно можна розглянути процес перетворення енергії в ході збуреної дії. Взявши за основу рівняння (1), одержимо

$$\int_{t_1}^t \sum_{i=0}^n a_i x^i x^I dt = 0.$$

Інтегрування здійснюється у межах від моменту  $t_1$ , коли відхилення досягнуло заданого значення  $x_0$  та зовнішня дія припинилась ( $F=0$ ), до довільного моменту  $t > t_1$ .

У відповідності до означення стійкості за Ляпуновим тривалість збуреної дії не обмежена, тому верхня межа змінна. Змінивши відповідно межі інтегрування, скористаємося виразами (3) – (9) та одержимо рівняння роботи

$$\begin{aligned} V(t) - V(t_1) = \frac{a_0}{2} (x^2 - x_0^2) + \frac{a_2}{2} [(x^I)^2 - (x_0^I)^2] + a_3 (x^{II} x^I - x_0^{II} x_0^I) + \\ + a_4 [x^{III} x^I - x_0^{III} x_0^I - \frac{1}{2} (x^{II})^2 + \frac{1}{2} (x_0^{II})^2] + a_5 (x^{IV} x^I - x_0^{IV} x_0^I - x^{III} x^{II} + x_0^{III} x_0^{II}) + \dots = \quad (10) \\ = - \int_{t_1}^t [a_1 (x^I)^2 - a_3 (x^{II})^2 + a_5 (x^{III})^2 \dots] dt. \end{aligned}$$

Рівнянням (10) визначається різниця значень приросту повної енергії динамічної системи. Значення  $V(t) - V(t_1)$  рівне кількості енергії, що віддається оточуючому середовищу або вводиться в сферу перетворення з середи в процесі збуреної дії за

інтервал часу  $\Delta t = t - t_1$ .

Взявши похідну по часу від обох частин рівняння (10), одержимо вираз

$$\frac{dV(t)}{dt} = -[a_1(x')^2 - a_2(x'')^2 + a_3(x''')^2],$$

що визначає потужність розсіювання енергії або виведення її в сферу перетворення в процесі збуреної дії.

#### Висновки

1. Математичний вираз приросту  $V(t)$  повної енергії динамічної системи є неперервною дійсною функцією, що відповідає вимогам, які пред'являються до функції Ляпунова.

2. Похідна за часом приросту повної енергії визначає потужність сил взаємодії динамічної системи з навколишнім середовищем при збуреному русі.

3. Приріст повної енергії є скалярною величиною, що дозволяє одержати сумарний приріст повної енергії для багатовимірної динамічної системи простим сумуванням окремих приростів по кожній узагальненій координаті (ступені вільності динамічної системи).

4. Оскільки при побудові функцій здійснюється інтегрування і диференціювання за часом, запропонований спосіб може використовуватися для аналізу рухів, описуваних рівнянням як з постійними коефіцієнтами, так і з коефіцієнтами, залежними від часу.

Для побудови функції Ляпунова і її похідної за часом, взятої в силу рівняння збуреного руху, необхідно виконати наступні операції:

– встановити параметри незбуреного руху та скласти систему рівнянь збуреного руху; скласти рівняння роботи узагальнених сил та виконати інтегрування доданків рівнянь в межах  $t_0 - t_1$  і  $t_1 - t$ ;

– виділити доданки, що визначають роботу, яка затрачується на приріст повної енергії  $V(t)$  і роботу сил взаємодії системи з середовищем, та взяти похідну  $dV(t)/dt$ .

Розглянутий спосіб використаний з позитивним результатом при розв'язанні прикладів, що містяться в роботі [2].

On an example of a disturbed motion equations with fixed factors the structure of the generalized forces on their ratio to the process of energy transformation is considered and the way of the Lyapunov's function construction is offered

1. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Наука, 1967.
2. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. М.: Наука, 1971.
3. Анопольский Л.Ю., Иргетов В.Д., Матросов В.М. Способы построения функции Ляпунова // Итоги науки и техники. Сер. Общая механика. М.: Винити, 1975. Т.2, С.53-87.
4. Развитие и применение метода функций Ляпунова // Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1992.
5. Зубов В.И. Аналитическое построение функции Ляпунова // Докл. РАН. 1994. Т.335, №6. С.888-893.
6. Аминов А.Б., Сиразетдинов Т.К. Функции Ляпунова для исследования устойчивости в целом нелинейных систем // Прикладная математика и механика. 1985. Т.49, вып.5.
7. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. М.: Наука, 1966.



## ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ МАКРОМОДУЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.

Левченко А.А., Кравчук О.И.

**Актуальность исследования и анализ предыдущих публикаций.** Радиотехнические средства за своим построением есть сложными техническими объектами. Обобщенным показателем надежности для них, что характеризует состояние и способность выполнять задачи по назначению в определенное время, есть коэффициент оперативной готовности. В работах [1,2,3,4,5] обосновано построение информационной модели прогноза *Ког* с помощью типичных операторов, в [2,3] полученные общие выражения для коэффициентов преобразования операторов, построенные модели *Ког* вооружения и военной техники (ВВТ) для случая, когда восстановления проводится заменой элементов. В [5] обоснованная возможность применения моделей, которые строятся с помощью типичных операторов для объектов с числовыми измерительным контролем состояния. В [6] построенная модель *Ког* для объектов с числовым измерительным контролем состояния и восстановлением путем замены элементов, когда алгоритм замены выполнены без ошибок.

Применения моделей *Ког* полученных в [2,3,6] для полного жизненного цикла систем невозможно, что связано с моделированием одного цикла обслуживания. Для реализации адаптивных информационных систем диагностики с прогнозированием, объектов с числовым измерительным контролем состояния и восстановлением путем регулирования параметров, к которым относятся радиотехнические средства, необходимо получить вид микромодуля процесса технического обслуживания и построить информационную модель *Ког*, где обращение к оператору восстановления состояния учитывает специфику и цикличность проведения операций.

**Объектом статьи** является информационное моделирование динамики изменения *Ког* в границах полного цикла обслуживания, а **предметом** – математические соотношения для операторов мероприятий обслуживания и алгоритмы синтеза информационных моделей. **Целью статьи** является обеспечение необходимого уровня *Ког* радиотехнических средств за счет использования микромодуля процесса ТО во время построения информационной модели *Ког*.

**Условия выполнения исследования.** Как объект эксплуатации средства, которые рассматриваются, представляют собой сложные технические системы из разнообразных элементов, имеют разные структурные схемы надежности в зависимости от типа. Следует заметить, что в состав систем, которые рассматриваются, не входит программное обеспечение.

Для достижения цели в статье следует получить вид коэффициента преобразования оператора восстановления путем регулирования и провести синтез модели *Ког* для соответствующих систем. Методом исследования является метод динамического баланса меры, методом синтеза информационной модели – метод синтеза моделей систем обеспечения эксплуатации с помощью типичных операторов. **Научная новизна работы** состоит в развитии и углублении теоретических и методических основ построения информационных моделей процесса технического обеспечения эксплуатации объектов с числовым измерительным контролем состояния.

В [3,6] были построены модели одного цикла процесса технического обслуживания радиотехнических средств (РТС) при однократном контроле ее работоспособности. Однако, после восстановления их всегда проверяют, и процесс контроля продолжается до устранения всех выявленных неисправностей (см.рис.1). Это значит, что

$$\begin{cases} q_{35} = q_{35'} = \dots, & q_{37} = q_{3'7} = \dots, & q_{63'} = q_{6'3''} = \dots, \\ q_{46} = q_{46'} = \dots, & q_{64'} = q_{6'4''} = \dots, & q_{48} = q_{4'8} = \dots, \\ q_{54'} = q_{5'4''} = \dots, & q_{53'} = q_{5'3''} = \dots \end{cases} \quad (1)$$

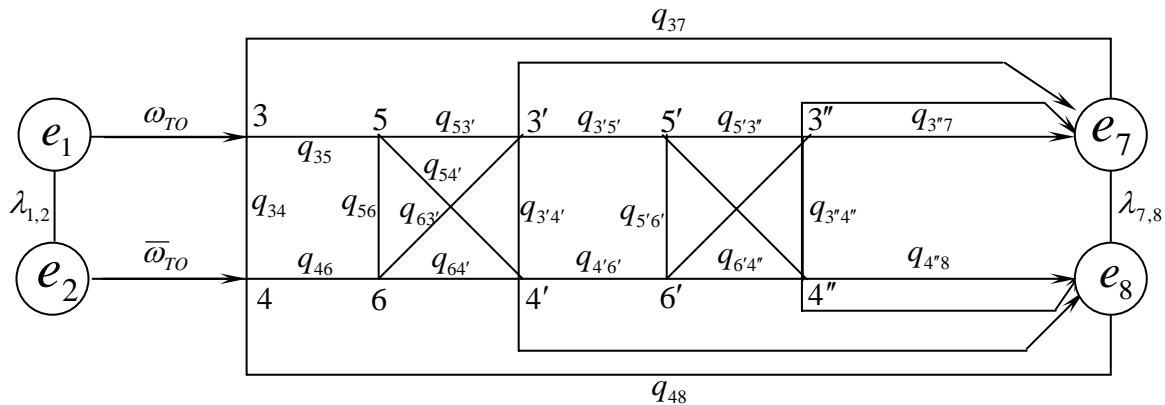


Рис. 1 Эквивалентная модель оператора ТО РТС учет многократного процесса „контроль-восстановление”

Используя процедуру укрупнения состояний метода динамического баланса меры [2,3], преобразуем структуру оператора технического обслуживания (ТО) к более компактному виду (см.рис.2), где

$$\begin{cases} q_{33'} = q_{35} q_{53'} + q_{34} q_{46} q_{63'} + q_{35} q_{56} q_{63'} , \\ q_{34'} = q_{35} q_{54'} + q_{35} q_{56} q_{64'} + q_{34} q_{46} q_{64'} , \\ q_{43'} = q_{46} q_{63'} , \\ q_{44'} = q_{46} q_{64'} . \end{cases} \quad (2)$$

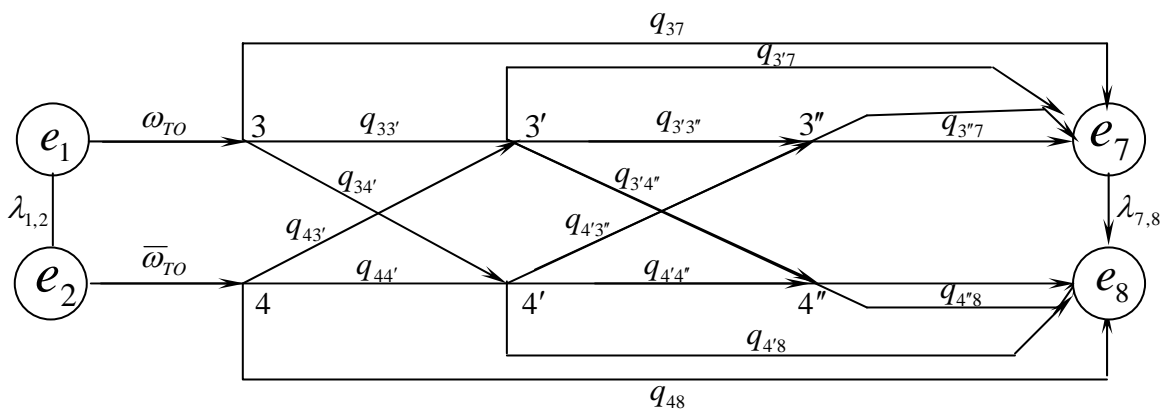


Рис. 2 Преобразованная эквивалентная модель ТО РТС

Аналогичным путем определяется коэффициенты  $q_{3'3''}, q_{3'4'}, q_{4'4''}, q_{4'3''}$ . Из (1)(2.4) и (2) видно, что

$$\begin{cases} q_{33'} = q_{3'3''} = \dots, & q_{3'4'} = q_{3'4''} = \dots, \\ q_{44'} = q_{4'4''} = \dots, & q_{43'} = q_{4'3''} = \dots \end{cases} \quad (3)$$

Для обеспечения нормального функционирования системы ТО РТС в техническом дивизионе необходимо иметь достаточное количество запасных элементов.

Следовательно, важно знать ресурс системы восстановления в определенных условиях эксплуатации, характеризующихся интенсивностью  $\lambda$  изменения вида технического состояния при соответствующей производительности системы ТО.

С учетом (3), расход ресурса восстановления при ТО для  $n$ -кратной процедуры контроля и замены элемента может быть определен при помощи уравнения:

$$\sum_{k=1}^n \begin{vmatrix} q_{33'} & q_{43'} \\ q_{34'} & q_{44'} \end{vmatrix}^k \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} q_B & q_B' \\ \bar{q}_B & \bar{q}_B' \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix}$$

Согласно [3] для квадратной матрицы с  $l$ -нормой  $\|X\|_l < 1$

$$\sum_{k=0}^{\infty} X^k A = (E - X)^{-1} A \quad (4)$$

где  $E$  - единичная матрица. В силу условия нормировки для коэффициентов преобразования типовых операторов можно записать соотношение для асимптоты, т.е. при  $n \rightarrow \infty$

$$\begin{vmatrix} q_B & q_B' \\ \bar{q}_B & \bar{q}_B' \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix} = (E - Q)^{-1} \cdot \omega - \begin{vmatrix} q_{33'} & q_{43'} \\ q_{34'} & q_{44'} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix},$$

где

$$Q = \begin{vmatrix} q_{33'} & q_{43'} \\ q_{34'} & q_{44'} \end{vmatrix}, \quad \omega = \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix}$$

Отсюда

$$\begin{vmatrix} q_B & q_B' \\ \bar{q}_B & \bar{q}_B' \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{(1 - q_{44'})q_{33'} + q_{34'}q_{43'}}{(1 - q_{33'})(1 - q_{44'}) - q_{34'}q_{43'}} & \frac{q_{43'}}{(1 - q_{33'})(1 - q_{44'}) - q_{34'}q_{43'}} \\ \frac{q_{34'}}{(1 - q_{33'})(1 - q_{44'}) - q_{34'}q_{43'}} & \frac{(1 - q_{33'})q_{44'} + q_{34'}q_{43'}}{(1 - q_{33'})(1 - q_{44'}) - q_{34'}q_{43'}} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

Таким образом, интенсивность расходования запасных элементов в системе ТО РТС определится как

$$\frac{dQ_B}{dt} = -(q_B + \bar{q}_B)\omega_{ТО} - (q_B' + \bar{q}_B')\bar{\omega}_{ТО}, \quad (6)$$

где  $\omega_{ТО} + \bar{\omega}_{ТО} = \Omega_{ТО}$  - производительность системы ТО РТС. Решая уравнение (6), можно найти требуемое количество запасных элементов для любого интервала времени функционирования системы ТО РТС без учета технического обслуживания запасных элементов.

В целом компоненты  $\omega_{ТО}$  и  $\bar{\omega}_{ТО}$  производительности системы ТО РТС можно определить с помощью формулы (4), учитывая, что

$$\begin{cases} q_{37} = q_{3'7} = \dots, \\ q_{48} = q_{4'8} = \dots \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{vmatrix} q_{37} & 0 \\ 0 & q_{48} \end{vmatrix} \cdot \left\{ \begin{vmatrix} q_{33'} & q_{43'} \\ q_{34'} & q_{44'} \end{vmatrix}^0 \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} q_{33'} & q_{43'} \\ q_{34'} & q_{44'} \end{vmatrix}^n \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix} \right\} = \begin{vmatrix} q_{ТО} & q_{ТО}' \\ \bar{q}_{ТО} & \bar{q}_{ТО}' \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{ТО} \\ \bar{\omega}_{ТО} \end{vmatrix}$$

и, после преобразования, окончательно:

$$\begin{vmatrix} q_{TO} & \dot{q}_{TO} \\ \bar{q}_{TO} & \dot{\bar{q}}_{TO} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{TO} \\ \bar{\omega}_{TO} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{(1-q_{44'})q_{37}}{(1-q_{33'})(1-q_{44'})-q_{34'}q_{43'}} & \frac{q_{43'}q_{37}}{(1-q_{33'})(1-q_{44'})-q_{34'}q_{43'}} \\ \frac{q_{34'}q_{48}}{(1-q_{33'})(1-q_{44'})-q_{34'}q_{43'}} & \frac{(1-q_{33'})q_{48}}{(1-q_{33'})(1-q_{44'})-q_{34'}q_{43'}} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{TO} \\ \bar{\omega}_{TO} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Таким образом, процесс технического обслуживания в отдельном цикле может быть описан некоторым эквивалентным макро модулем оператора ТО РТС (см.рис.3).

При наличии ресурса макро модуль является стандартным для всех циклов эксплуатации по отношению к структуре. В зависимости от режимов содержания до и после обслуживания состояния  $e_1, e_2, e_7, e_8$ , заменяются соответствующими состояниями, и получается модель для соответствующего цикла технического обеспечения. Последовательное соединение этих стандартных макро модулей дает модель системы ТО РТС для всего периода эксплуатации.

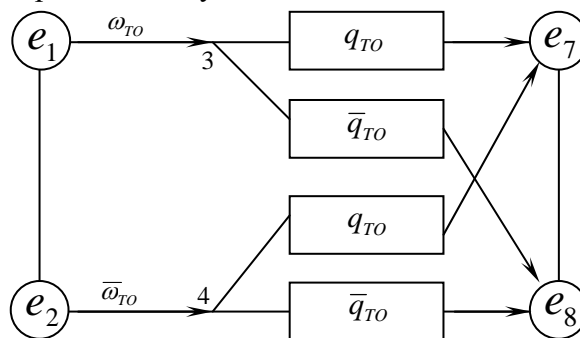


Рис. 3 Макро модуль оператора ТО РТС

Для случая, когда ресурс восстановления исчерпан и неисправные РТС исключаются из эксплуатации, модель претерпит некоторые изменения (см.рис.4).

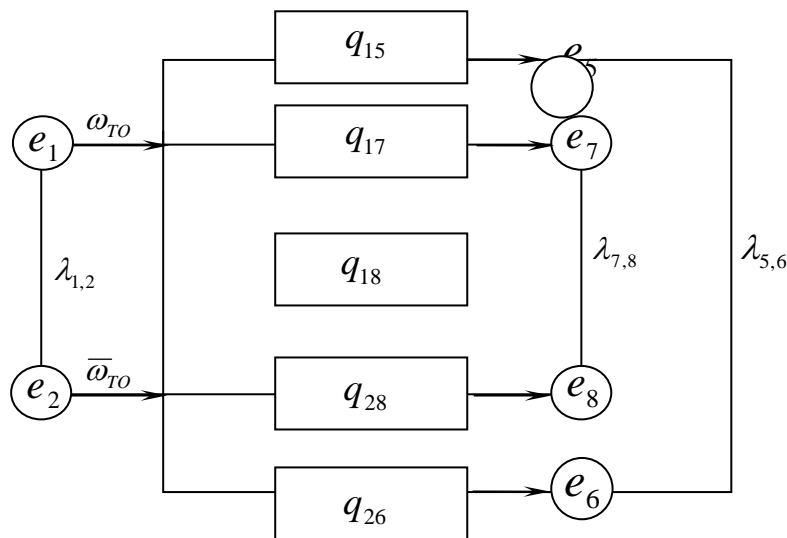


Рис.4 Макро модуль оператора ТО РТС в случае отсутствия ресурсов

Процесс ТО элементов РТС из-за того, что время обслуживания  $\tau_{TO}$  значительно меньше срока эксплуатации, можно считать одновременным. В таком случае модель системы ТО РТС по элементам представляет собой  $m$  независимых каналов обслуживания по числу элементов. Согласно структурной схеме надежности РТС, их

систему ТО и Р можно рассматривать как систему, состоящую из 5 независимых каналов обслуживания.

**Выводы.**

Таким образом, использование макромодулей процесса технического обслуживания облегчает построение модели системы ТО РТС в целом. Последовательное соединение таких макромодулей позволяет моделировать процесс обслуживания на любом интервале времени и в течение всего срока эксплуатации. А полная модель системы ТО РТС состоит из пяти таких последовательностей.

В силу стандартности модели макромодуля цикла обслуживания математическое описание модели системы обслуживания для всего периода эксплуатации будет сравнительно простым, так как имеется возможность представления в рекуррентной форме.

В представленном ракурсе РТС фигурируют как объекты с числовым измерительным контролем состояния и восстановлением (устранением латентных отказов (ЛО)) путем регулирования параметров. Полученные соотношения делают возможным программную реализацию систем диагностики второго рода в адаптивных информационных измерительных вычислительных комплексах систем ТО и Р сложных технических систем. Это делает возможным трансформацию систем ТО и Р в интегрированные комплексные системы обеспечения эксплуатации.

In article presentation guarantee necessity levels *K<sub>ог</sub>* radio technical take to use micro modules process technique service in time building information model *K<sub>ог</sub>*.

1. Левин С.Ф. Основы теории обеспечения эксплуатации технических объектов. - МО СССР, 1982. – 99 с.
2. Левин С.Ф. Статистический анализ систем обеспечения эксплуатации технических объектов - М. : Изд. АН СССР , 1989г.
3. Левин С.Ф. Статистический анализ и синтез в системе обеспечения эксплуатации/ Отчёт о НИР “Декстрин” кн. 1. - Одесса: ОВВКИУ ПВО, 1980, 33 с.
4. Левченко А.А., Яковлев М.Ю., Фролов В.Я., Скорін Ю.І. Оптимізація технічного обслуговування і ремонту групи однотипних складних технічних комплексів під час зберігання. // Открытые информационные и компьютерные технологии/ Сборник научных трудов Государственного университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" Выпуск 8, 1999 г. - С.135-139.
5. Бугаев С.Н., Хаджипуло Ю.Б., Левченко А.О. Можливості використання операторних моделей процесів забезпечення експлуатації / НТЗ №5 Ч.1. – Одеса: ОІСВ, 1999, с.46-52.
6. Левченко А.О. Загальна математична модель прогнозу ймовірності відмов озброєння та військової техніки в залежності від заходів технічного забезпечення/ Підсумковий звіт з НДР “Модель-2000” кн. 1. - Одеса: ОІСВ, 2000, 238 с.

УДК 681.513.675:664.12

## ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ В СИСТЕМІ АТОМАТИЗАЦІЇ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

Пономарьов Я.Ю., Ладанюк А.П., Івашук В.В.

В системах автоматизації випарних установок (ВУ) завжди створюються контури стабілізації рівнів продукту в окремих корпусах. Точність підтримання рівнів безпосередньо впливає на техніко-економічні показники функціонування ВУ, забезпечуючи максимальне значення коефіцієнта теплопередачі та значення витрати гріючої пари [1]. Як правило контури стабілізації рівнів використовують пропорційні регулятори, які не забезпечують необхідних показників якості перехідних процесів в умовах інтенсивних збурень (змінювання відборів вторинної пари, витрати продукту на вході та виході ВУ). Задача стабілізації рівнів продукту ускладнюється, коли за умов значної продуктивності на різних ступенях випарювання встановлюються два випарних апарати. Так Лохвицький цукровий завод має 5-корпусну ВУ, при цьому 1, 2, 3 корпуси складаються з двох апаратів (А, Б), а 4 та 5 корпуси – з одного. Для покращення якості регулювання застосували ПД-регулятори рівня, які формували сигнали керування на регулювальні органи, встановлені на вході кожного корпусу. Значення рівня в апараті Б значною мірою залежить від роботи суміжних корпусів, що приводить до суттєвих відхилень від заданого значення (рис. 1, 2).

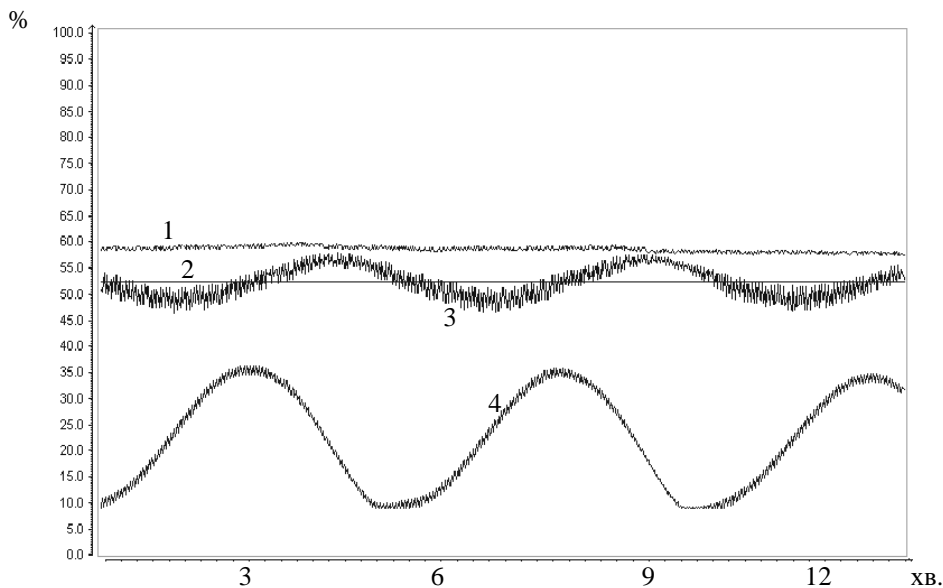


Рис.1 Приклад ПД-регулювання в однокорпусному випарному апараті:

1 - вміст сухих речовин в цукровому сиропі (%), 2 - завдання на утримання рівня у ВУ (%), 3 - дійсний рівень в корпусі ВУ (%), 4 – рівень відкриття заслінки на вході ВУ (%).

В сезоні 2005 року в системі регулювання рівнів застосовано та проведено дослідження функціонування нечіткого регулятора, реалізованого на контролері SIMATIC S7 з використанням технології штучного інтелекту [1, 2] FUZZY LOGIC (нечітка логіка). Методика застосовується у випадках, де переоцінка моделі об'єкта не може бути здійснена в реальному режимі часу, але зміни спостережних координат в об'єкті мають стрибкоподібний характер. Особливістю такого регулювання є врахування кількох

змінних для формування керуючого впливу, до того ж виміряні аргументи реалізують свої зміни в статистиці.

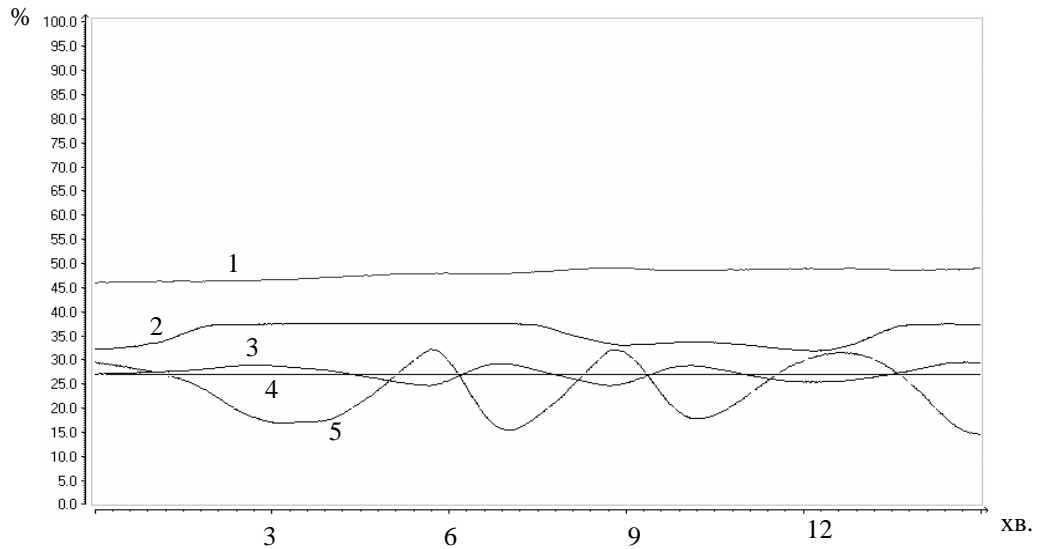


Рис.2. Приклад ПД-регулювання в подвійному випарному апараті:

1 – рівень в збірнику перед ВУ (%), 2 – дійсний рівень в корпусі А ВУ (%), 3 – дійсний рівень в корпусі Б ВУ (%), 4 – завдання на утримання рівня (%), 5 – рівень відкриття заслінки (%).

Такий підхід особливо важливий для тих систем, де коефіцієнт впливу між виміряними величинами та впливом на об'єкт має змінюватися достатньо швидко, причому вхідні дані, якими доводиться оперувати, змінюються постійно, а оцінка їх значень має невисоку точність. Методикою такого керування є заміна складної математичної моделі об'єкта логічною моделлю. Для встановлення логічних правил керування приймається досвід оператора, що керує об'єктом. Для реалізації нечіткого регулятора застосовується система типу Мамдані [3]:

**Якщо Змінна1 та Змінна2, тоді Результат**

Реалізація правил логічного висновку проводиться на підставі таблиці відповідності, яка формує найпростішу логічну конструкцію у вигляді нечітких термів (табл. 1).

Таблиця1

Логічна формула регулятора рівнів подвійних випарних апаратів

Стан рівня в корпусі Б	Стан рівня в корпусі А випарного апарату				
	N_BIG	N_SMAL	NULL	P_SMAL	P_BIG
N_BIG	P_BIG	P_BIG	P_SMAL	N_SMAL	N_SMAL
N_SMAL	P_BIG	P_SMAL	NULL	NULL	N_SMAL
NULL	P_SMAL	NULL	NULL	NULL	N_SMAL
P_SMAL	NULL	NULL	N_SMAL	N_SMAL	N_BIG
P_BIG	N_SMAL	N_SMAL	N_SMAL	N_SMAL	N_BIG
	Стан виконавчих механізмів на вході випарних апаратів				

Якщо в процесі фазифікації термам, що визначають стан технологічних змінних, присвоїти симетричні функції активації, з чітко визначеними межами, то реакція виконавчого механізму буде мати стрибкоподібний характер. Для підвищення точності позиціонування виконавчого механізму кожний стан описується трьома термами: зростанням (BIG), характерністю (SMAL) і спадом (NULL).

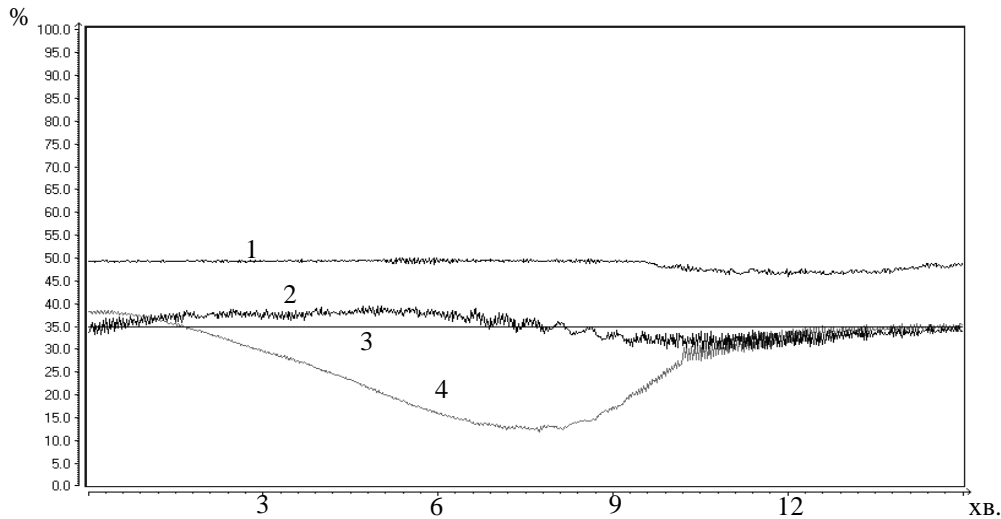


Рис. 3 Поведінка 3-го випарного апарата при ПД-регулюванні:

1 – дійсний рівень в корпусі Б (%), 2 – дійсний рівень в корпусі А (%), 3 – завдання на утримання рівня у ВУ (%), 4 – рівень відкриття заслінки (%).

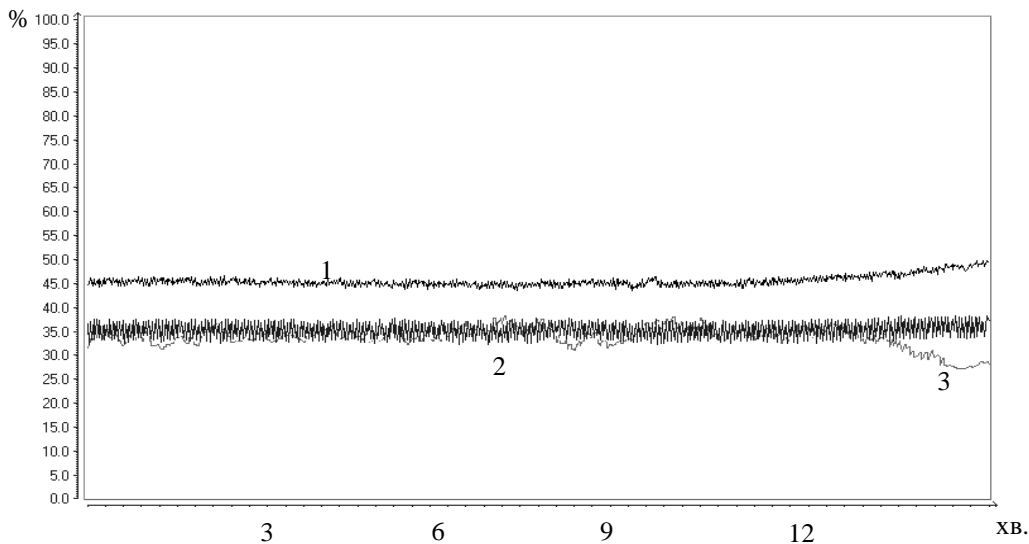


Рис. 4 Поведінка 3-го випарного апарата при регулюванні за допомогою FUZZY LOGIC:

1 – дійсний рівень в корпусі Б (%), 2 – дійсний рівень в корпусі А (%), 3 – рівень відкриття заслінки (%).

Міра нечіткості оцінок  $\Delta_i$  технологічних змінних, що активують відповідне значення терму, забезпечує завадозахищеність алгоритму, зменшує кількість зайвих перемикачів виконавчого механізму, що є необхідним для регулювання швидкоплинних процесів в промислових умовах. Отже, збільшення зони невизначеності дозволяє уповільнювати зміну стану управляючих діянь (виконавчих органів). Міра перетину множин встановлюється на підставі інтуїтивного представлення про необхідний вплив для реалізованого стану та розміру множин, якими представлено відповідний терм.

Найбільш ефективно алгоритм працює на подвійному випарному апараті 3-тньої ступені, що має найбільш складні для стабілізації умови регулювання (рис. 3).

Після впровадження алгоритму нечіткого регулятора зменшується динамічна похибка регулювання та час перехідного процесу (рис. 4), також зростає інтенсивність випарювання, про що може свідчити відповідні коливання рівня у ВУ. Так, аналізуючи



результати до і після впровадження нечіткого регулювання маємо тенденцію до збільшення продуктивності ВУ.

В результаті впровадженого алгоритму нечіткого регулювання було досягнуто стабілізації рівнів по корпусам випарної станції, зменшена динамічна похибка та час перехідного процесу, що підвищило дійсну продуктивність випарної установки. Встановлена відповідність технологічному регламенту випарювання зменшила вміст цукру в конденсаті, що повертається на пароутворення. Також зникла необхідність адаптації коефіцієнтів підсилення ПД-регулятора при змінюванні режимів роботи ВУ.

In the report the problem of technological complexes with presence of processes of physical-chemical transformations is considered. For realization of a method of identification the algorithm of selection of signals is developed on the basis of wavelet-transformation, the method of an estimation of the characteristics of dependence is developed which is observed, algorithm of construction of nonlinear models of the certain behaviour, which advantages prove to be true by results of imitating modeling and introduction to industrial production.

1. Рыжов А. П. Оценка степени нечеткости и ее применение в системах искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы. Т.1, Вып. 1 - 4, Москва, МНЦ КИТ, 1996, с. 95 – 102.
2. Рыжов А. П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложения. Москва, МНЦ КИТ, 1996, 81с..
3. Шапиро Д. И. Организационные системы управления: использование расплывчатых категорий. М., Энергоатомиздат, 1983, 117с..

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОТВОДА ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК МОРСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Федоровский К.Ю., Владецкий Д.О.

Энергетическая установка (ЭУ) и, в частности, её система охлаждения являются одним из основных элементов судна. В настоящее время в судовой энергетике широко применяются разомкнутые двухконтурные системы охлаждения, предусматривающие прием забортной охлаждающей воды. Однако использование таких систем имеет ряд существенных недостатков. Во время эксплуатации почти всех типов судов и морских технических средств (стационарные и полупогружные буровые платформы и т.д.) имеются режимы работы, когда целесообразно отказаться от приема забортной охлаждающей воды. Примерами могут служить случаи работы судов технического флота в сильно загрязненной акватории, плавания во льдах, стоянки судна в порту и т.д. При этом происходит интенсивное засорение кингстонных ящиков, фильтров, теплообменников и других элементов контура системы охлаждения забортной воды. Кроме того, при эксплуатации буровых платформ по экологическим и техническим причинам [4] целесообразно отказаться от приема забортной охлаждающей воды.

Для морских технических средств, в первую очередь буровых платформ, предлагается создавать замкнутые системы охлаждения. В таких системах часто в качестве теплоотводящих поверхностей выступают различные корпусные конструкции, погруженные в забортную воду. В случае необходимости теплообменные поверхности могут быть выполнены в виде пакета расположенных с зазором параллельных пластин, т.е. погружного пластинчатого теплообменного аппарата (ПТОА) [3]. В таких аппаратах охлаждаемая горячая пресная вода движется внутри пластин по специальным лабиринтным каналам. Теплоотдача от наружных стенок к забортной воде осуществляется при свободной конвекции. Так как данный режим характеризуется довольно низкими значениями коэффициента теплоотдачи, то для обеспечения необходимого теплоотода требуются значительные площади теплообменника. Интенсификация теплоотдачи в ПТОА может быть выполнена путем подачи воздуха в зазор между теплоотдающими поверхностями по методу, предложенному в [2].

Эффект интенсификации теплоотдачи основан на том, что поднимающиеся пузырьки воздуха турбулизируют жидкость в зазоре и проталкивают ее вдоль поверхности теплообмена, одновременно подсасывая холодную жидкость из окружающего пространства. Кроме того, поднимаясь на поверхность, пузырьки воздуха двигаются по спирали, за счет этого они внедряются в пристенный пограничный слой, разрушая его, и тем самым резко способствуя увеличению теплоотдачи.

Для подтверждения данного процесса, а так же выявления характера взаимодействия газожидкостной струи, с теплоотдающими поверхностями ПТОА, нами были проведены визуальные исследования на прозрачной модели.

На фотографии (рисунок 1) зафиксированы места ударов пузырька по теплоотдающей поверхности, в результате чего, как отмечалось раньше, разрушается пристенный пограничный слой, препятствующий теплоотдаче. Пузырек движется по спирали с постоянным шагом  $H = 15$  мм. Размеры пятна, оставленного пузырьком на прозрачной стенке, позволяют оценить его диаметр. В нашем случае он составляет примерно 3 мм. В процессе эксперимента так же анализировалась зависимость скорости всплытия от радиуса пузырька. Для случая, представленного на рисунке 1 она остается примерно постоянной и равной 0,17 м/с.

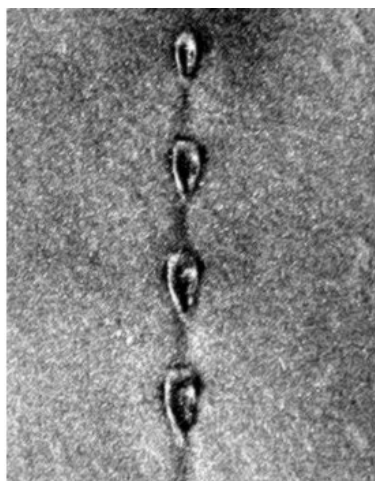


Рис. 1 Визуализация ударов пузырька о теплоотдающую поверхность

Так же было исследовано влияние положения газового коллектора относительно теплоотдающих пластин на характер течения газожидкостной струи (рисунок 2). Так как угол раскрытия газожидкостной струи практически постоянный и равный  $\gamma = 22 \dots 24^\circ$ , то для исключения образования застойных зон и обеспечения максимального воздействия газожидкостной струи на теплоотдающие поверхности газовый коллектор должен быть установлен на некотором расстоянии ниже пластин. С учетом того, что угол раскрытия газожидкостной струи  $\gamma$  постоянный, то оптимальным расстоянием следует считать  $Z \approx 2\delta$ , где  $\delta$  – расстояние между теплоотдающими поверхностями.

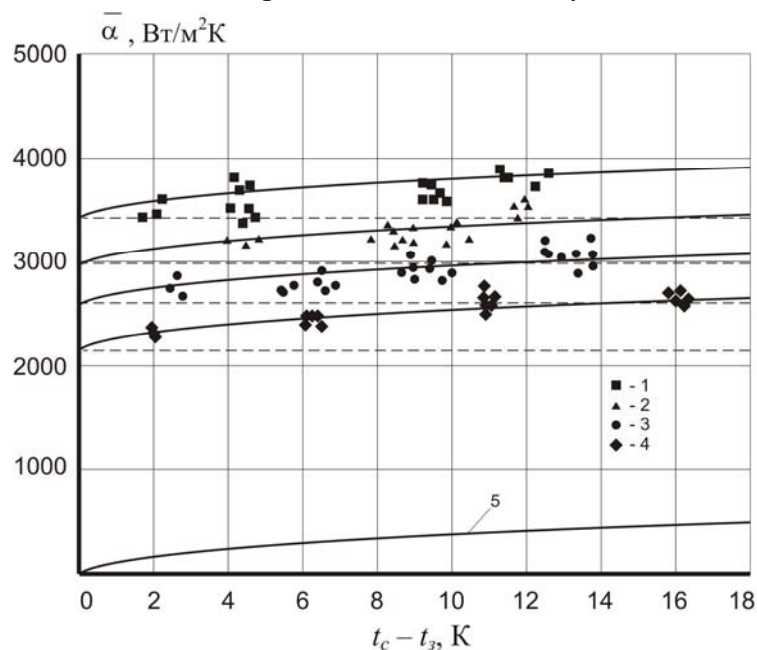


Рис. 2 Визуализация течения газожидкостной струи в зазоре между теплоотдающими поверхностями

Для определения уравнения подобия, описывающего процесс теплоотдачи газожидкостных струй, нами были проведены исследования на экспериментальной модели. Она представляла собой две вертикальные параллельные пластины с шириной теплоотдающей поверхности 0,5 м и высотой 0,8 м каждая, расположенные с зазором и помещенные в емкость с водой объемом около 17 м<sup>3</sup>.

Теплоотдача в ПТОО с использованием газожидкостных струй сопоставлялась с данными, полученными Луневым А.А. [3], для теплоотдачи в условиях свободной конвекции. На рисунке 3 представлены экспериментальные данные при зазоре между теплоотдающими поверхностями  $\delta = 40$  мм. Наглядно видно, что в случае использования газожидкостных струй теплоотдача по сравнению со случаем свободной конвекции существенно увеличивается. Анализ показал, что при этом может быть использован принцип суперпозиции, в соответствии с которым результирующая теплоотдача определяется как сумма теплоотдачи при свободной конвекции и теплоотдачи за счет движения пузырьков воздуха.

Данные, представленные на рисунке 3 наглядно показывают эффективность метода интенсификации. При удельном расходе газа  $W_{ГЛ} = 2,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с и температурных напорах между теплоотдающей стенкой и забортной водой 8...10 °С увеличение теплоотдачи



1 – удельный расход газа  $W_{ГЛ} = 2,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с; 2 –  $1,7 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с; 3 –  $1,1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с; 4 –  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с; 5 – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции [3]

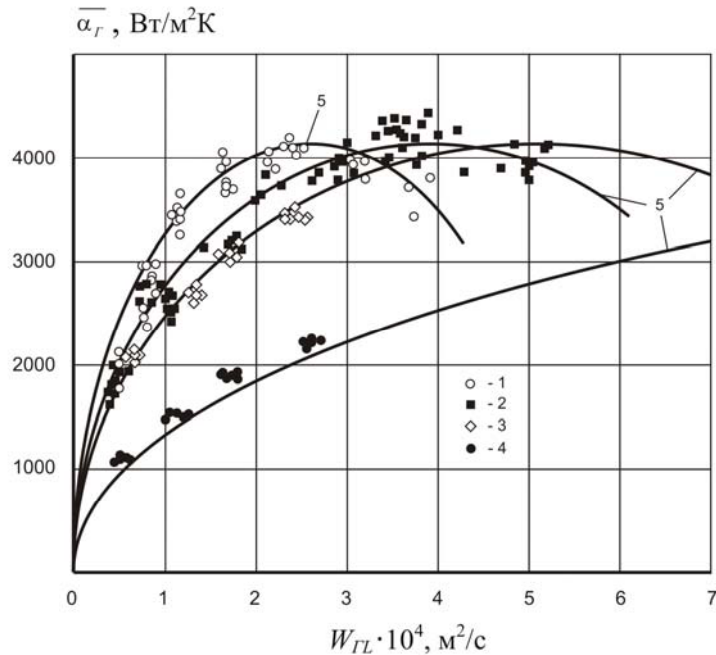
Рис. 3 Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  от температурного напора при  $\delta = 40$  мм

достигает 12...17 раз по сравнению со случаем свободной конвекции. Кроме того, увеличение расхода газа существенно интенсифицирует процесс теплоотдачи, например, при температурном напоре  $t_c - t_3 = 10$  °С, увеличение удельного расхода воздуха с  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с до  $2,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с увеличивает коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  с 2500 до 3800 Вт/м<sup>2</sup>К.

Однако данный метод интенсификации теплоотдачи имеет свои ограничения. Очевидно, что существует предельное значение удельного расхода воздуха  $W_{ГЛ}$ , при котором наступает кризис теплоотдачи. Это происходит вследствие того, что при повышении расхода газа пузырьки воздуха сливаются друг с другом, увеличиваются в размерах и замещают забортную воду из зазора между поверхностями, ухудшая

теплоотдачу. Очевидно предположить, что увеличение расхода выше некоторой критической величины может привести к кризису процесса теплоотдачи.

С целью выяснения возможности данного явления были проведены соответствующие целенаправленные исследования. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Эксперименты проводились при удельных расходах воздуха  $W_{ГЛ} = 0,5 \cdot 10^{-4} \dots 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  и расстояниях между теплоотдающими поверхностями  $\delta = 20, 30, 40$  и  $160$  мм. На рисунке 4 показана зависимость между газожидкостной составляющей коэффициента теплоотдачи  $\overline{\alpha}_Г$  и удельным расходом воздуха  $W_{ГЛ}$ . Значение  $\overline{\alpha}_Г$  определяется как разность между результирующим коэффициентом теплоотдачи и его свободно-конвективной составляющей.



1 – зазор между теплоотдающими поверхностями  $\delta = 20$  мм;  
 2 – 30 мм; 3 – 40 мм; 4 – 160 мм;  
 5 – расчет по зависимости (1)

Рис. 4 Зависимость  $\overline{\alpha}_Г$  от удельного расхода воздуха  $W_{ГЛ}$

При увеличении подачи воздуха в зазор между теплоотдающими поверхностями, коэффициент теплоотдачи растет до определенной величины, а затем начинает уменьшаться. Наглядно видно, что для  $\delta = 20$  мм такое критическое значение расхода  $W_{ГЛ} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , а для  $\delta = 30$  мм расход  $W_{ГЛ} = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Нами было выполнено теоретическое исследование данного вопроса с использованием в качестве исходных результатов данные работы [1]. В итоге получена зависимость, описывающая кризис теплоотдачи

$$\overline{\alpha}_Г = 500 \left[ 2056 \frac{W_{ГЛ}}{0,18\delta + W_{ГЛ}} - 15346 \left[ \frac{W_{ГЛ}}{0,18\delta + W_{ГЛ}} \right]^2 \right]^{0,5}. \quad (1)$$

Результаты, полученные по зависимости (1), хорошо согласуются с экспериментальными данными практически во всем интервале расходов воздуха  $W_{ГЛ}$ .

Окончательная обработка экспериментального материала представлена на рисунке 5. Уравнение подобия, соответствующее данной обработке, имеет вид:

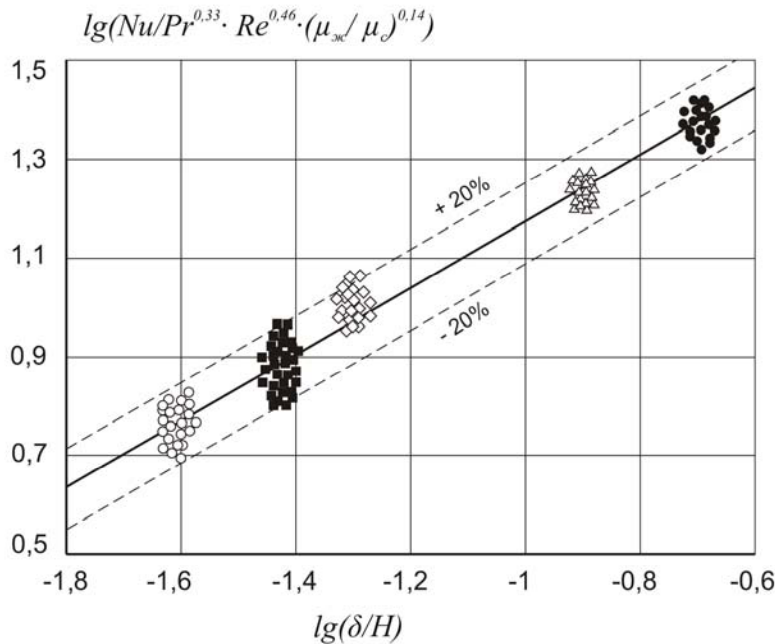


Рис. 5 Зависимость  $\lg(Nu/Pr^{0.33} Re^{*0.46} (\mu_w/\mu_c))$  от  $\lg(\delta/H)$

$$\overline{Nu} = 73 \cdot Re^{*0.46} \cdot Pr^{0.33} \cdot (\delta/H)^{0.69} \cdot (\mu_w/\mu_c)^{0.14}, \quad (2)$$

где  $Re^*$  – модифицированное число Рейнольдса. Уравнение (2) справедливо для:  $Re^* = 36.8 \dots 629.7$ ;  $Pr = 4.74 \dots 9$ ;  $\mu_w/\mu_c = 0.62 \dots 2.52$ ;  $\delta/H = 0.025 \dots 0.2$ .

Таким образом, использование данного метода для интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения энергоустановок морских технических средств является достаточно перспективным с точки зрения снижения эксплуатационных затрат и улучшения массогабаритных и энергетических характеристик теплообменного оборудования, что способствует более широкому практическому внедрению замкнутых систем охлаждения.

Results of visual researches of current of gas and liquid jets and intensifications warmly feedbacks with use of these jets in immersed lamellar warmly exchange devices of the closed systems of cooling are resulted. Crisis of a heat-conducting path in the given conditions is researched.

1. Головин А.М. Гидродинамика системы пузырей в жидкости малой вязкости/ А.М. Головин, В.Г. Левич, В.В. Толмачев// Прикладная механика и техническая физика. – 1966. – №2 – С. 63-71.

2. Федоровский К.Ю. Визуальные исследования процесса интенсификации теплоотдачи конечному поглотителю затопленными газожидкостными струями/ К.Ю. Федоровский, Д.О. Владецкий// Сб. научных трудов СНИЯЭиП. – Севастополь, 2004. – Вып. № 12. – С. 32-36.

3. Федоровский К.Ю. Теплоотдача при свободной конвекции в погружном пластинчатом теплообменном аппарате/ К.Ю. Федоровский, А.А. Лунев// Живучесть корабля и безопасность на море: Материалы науч. техн. конф., г. Севастополь, май 2005 г. – С. 94-95.

4. Цыпин В.М. Возможности снижения вредного влияния работы энергетических установок буровых платформ на окружающую среду/ В.М. Цыпин, Л.Н. Пшенин // Основы проектирования плавучих буровых установок: Материалы всесоюзной науч. техн. конф., г. Москва, сент. 1980 г. – М., 1980. – С. 278-283.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 621.311

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В  
ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ХЕРСОНСКОЙ ОБЛАСТИ

Боярчук В.П., Головащенко Н.В., Рудакова А.В.

**Постановка проблемы.** В настоящее время, современные энергосистемы (ЭС) представляют собой сложные, многосвязные, пространственно разнесенные иерархические объекты, функционирующие в условиях переменности их структуры, параметров и режимов работы при многочисленных внешних и внутренних возмущениях как систематического, так и случайного характера [1]. Это определяет сложность задач управления ими, и изучение свойств энергообъединения как объекта управления приобретает особо важное значение.

Для решения таких задач, необходимо использовать модель системы, которая бы в полной мере характеризовала все динамические процессы, протекающие в ЭС и была адекватной распределению нагрузки между узлами ЭС в условиях переменности ее структуры.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Усложнение энергосистемы заставляет по-новому подойти к оперативной оптимизации распределения нагрузок между узлами энергосистемы. Использование традиционных дискретных моделей для оптимизации всех взаимосвязей между параметрами режима и накладываемых на них ограничений, настолько усложняет постановку задачи, что даже при использовании современных ЭВМ она оказывается слишком громоздкой [2].

При принятии решений в большой энергетической системе необходимо обеспечивать максимальную быстроту и простоту вычислительного алгоритма, для того чтобы решение об управлении было своевременным. Такими качествами обладают непрерывные модели энергосистем, которые позволяют определить оперативное оптимальное управление режимами функционирования энергосистемы достаточно быстро, так как для них можно использовать мощный аппарат вариационного исчисления.

Если рассматривать энергосистему как объект управления с фрактальной структурой [3], то для каждого уровня иерархии непрерывную модель ЭС можно представить в виде поверхности запаса мощности [4]. Модель, рассмотренная в [4] является статической, а как известно все процессы распределения электроэнергии в ЭС значительно зависят от времени. Динамика потребления электроэнергии разными потребителями хорошо аппроксимируются рядами Фурье [5], и может быть использована для построения динамической модели распределения электроэнергии в регионе.

**Постановка задачи.** Необходимо разработать динамическую модель распределения электроэнергии в локальной области в виде изменяющейся во времени поверхности запаса мощности и провести моделирование на основе статистических данных о нагрузках.

**Основная часть.** Для описания динамики в статической модели поверхности запаса электроэнергии необходимо учесть изменения мощности источников и потребителей электроэнергии во времени. Тогда модель будет задаваться следующими соотношениями:

$$P(x, y, t) = \sum_i f_i(x, y, t) = P_{cp.n}(t) + \sum_{i=1}^{N_n} (P_{\max n_i}(t) - P_{cp.n}(t)) \cdot e^{-\alpha_i t} \quad (1)$$

и

$$I(x, y, t) = \sum_j F_j(x, y, t) = \sum_{j=1}^{N_u} P_{u_j}(t) \cdot e^{-\alpha_j r_j}, \quad (2)$$

где  $N_u, N_n$  – количество узлов источников и потребителей соответственно;  $\alpha_i$  – коэффициент затухания экспоненты, определяющийся из условия сохранения мощности под графиком поверхности для данной области локализации

$$4d_i^2 \cdot P_{n_i}(t) = 2\pi \frac{P_{\max n_i}(t) - P_{cp n}(t)}{\alpha_i^2} + \frac{P_{cp n}(t) \cdot x_{\max} y_{\max}}{N_n}; \quad r_i, r_j - \text{расстояние от центра}$$

области локализации  $i$ -го потребителя  $(x_{y_i}, y_{y_i})$ ,  $j$ -го источника  $(x_{y_j}, y_{y_j})$  до любой

точки района с координатами  $(x_k, y_k)$ ,  $r_i = \sqrt{(x_k - x_{y_i})^2 + (y_k - y_{y_i})^2}$ ,

$r_j = \sqrt{(x_k - x_{y_j})^2 + (y_k - y_{y_j})^2}$ ;  $P_{n_i}(t), P_{u_j}(t)$  – мощность  $i$ -го потребительского и  $j$ -го

генерирующего узла соответственно;  $P_{cp,n}(t)$  – средняя мощность потребления в этом

районе,  $P_{cp,n}(t) = \left( \sum_{i=1}^{N_n} P_{n_i}(t) \cdot S_i \right) / S_p$ ;  $S_i = 4d_i^2$  – площадь области локализации  $i$ -го

потребителя;  $S_p = x_{\max} y_{\max}$  – площадь района;  $P_{\max n_i}(t)$  – максимальная потребляемая мощность  $i$ -м потребителем, ( $P_{\max n_i}(t) = 2P_{n_i}(t) - P_{cp n}(t)$ ).

Поверхность запаса электроэнергии определяется как разница между поверхностями энергоснабжения и энергопотребления:

$$Z(x, y, t) = I(x, y, t) - \Pi(x, y, t)$$

Модели графиков суточной нагрузки для каждого узла ( $j$ -го источника или  $i$ -го потребителя) имеет вид:

$$\begin{aligned} P_{n_i}(t) &= P_{cp n_i} + \sum_{k=1}^{n_{n_i}} A_{n_{ik}} \cdot \cos(k\omega_{n_i} t + \varphi_{n_{ik}}), \\ P_{u_j}(t) &= P_{cp u_j} + \sum_{k=1}^{n_{u_j}} A_{u_{jk}} \cdot \cos(k\omega_{u_j} t + \varphi_{u_{jk}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_{cp n_i}, P_{cp u_j}$  – среднесуточная мощность энергопотребления  $i$ -м потребителем и

энергоснабжения  $j$ -м поставщиком;  $t$  – время на протяжении дня, час ( $t = 1 \dots T_c$ ),  $T_c = 24$

часа;  $n_{n_i}, n_{u_j}$  – количество гармоник ряда Фурье, обуславливающее адекватность

модели;  $A_{n_{ik}}, A_{u_{jk}}, \varphi_{n_{ik}}, \varphi_{u_{jk}}$  – коэффициенты разложения в ряд Фурье;  $\omega_{n_i}, \omega_{u_j}$  –

первая (основная) гармоника разложения в ряд Фурье,  $i = \overline{1, N_n}, j = \overline{1, N_u}$ .

Неизвестные параметры модели можно определить с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Рассмотрим динамику энергораспределения нагрузки на примере энергетической системы Херсонской области. Энергетическая система Херсонской области может быть представлена в иерархическом виде (рис.1) согласно [3].



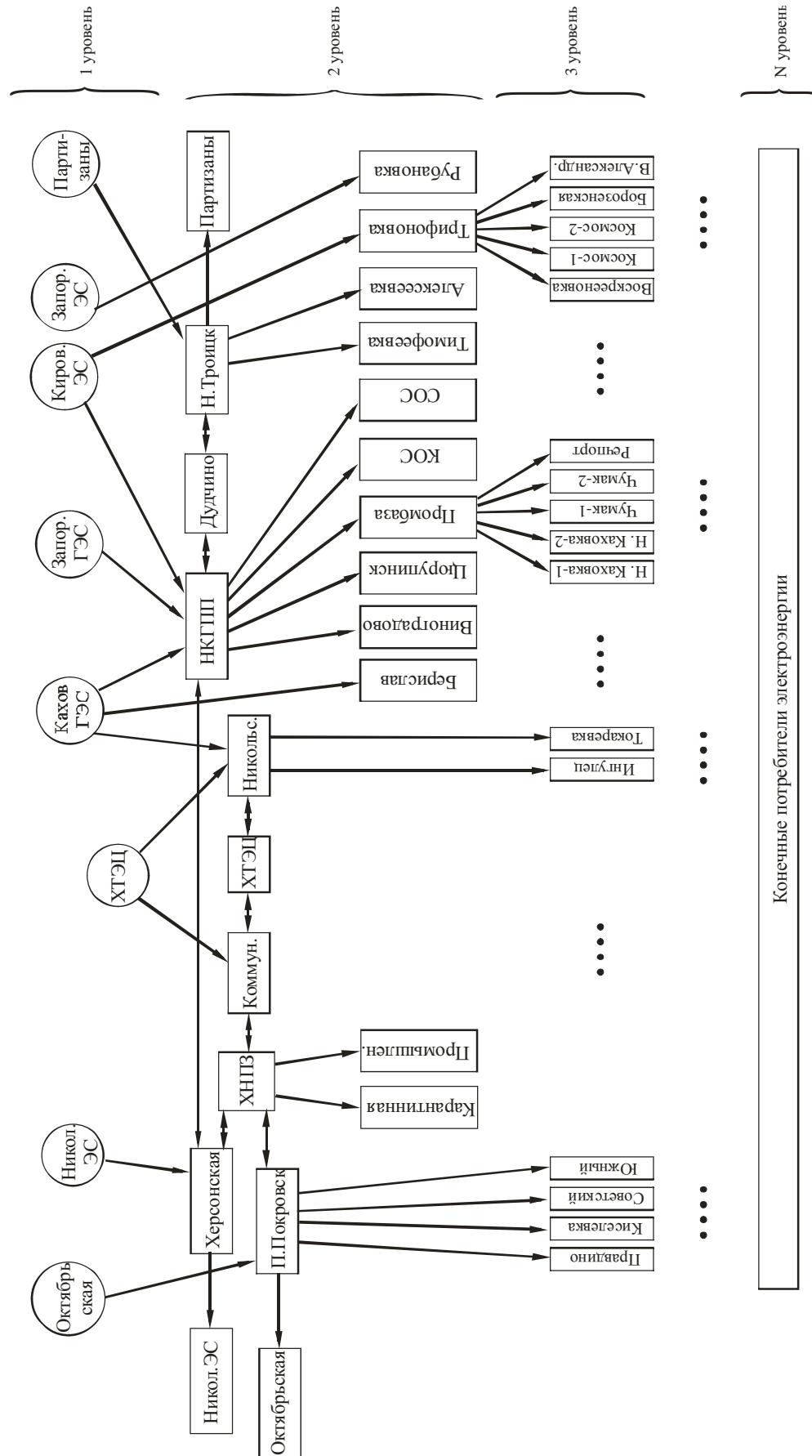


Рис. 1 – Обобщенная иерархическая схема энергетической системы Херсонской области

Для моделирования распределения нагрузки ЭС Херсонской области используются узлы 1 и 2-го уровня энергосистемы представленной на рис. 1.

Часть схемы, выбираемая для моделирования, может быть представлена как фрагмент фрактальной системы с перекрестными связями (рис. 2).

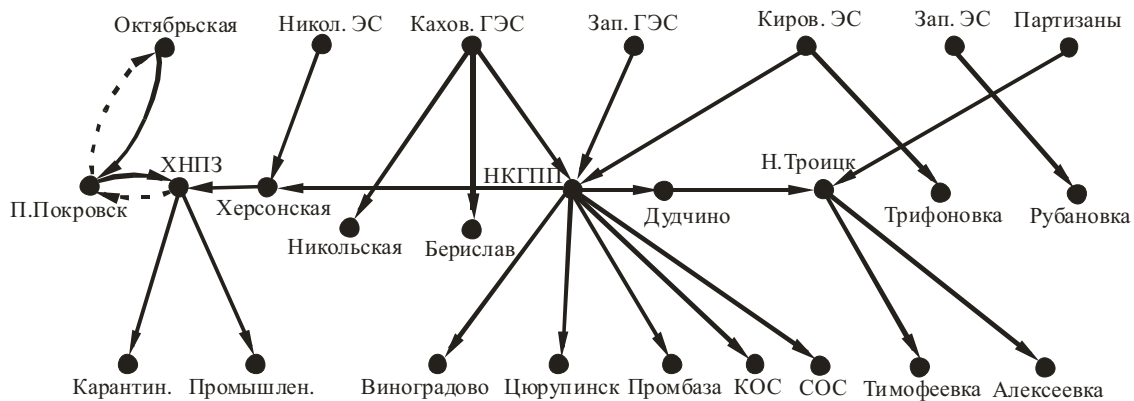


Рис. 2 Фрагмент фрактальной структуры ЭС Херсонской области

Для построения поверхности запаса мощности необходимо задать координаты расположения объектов на местности. Для расчетов используется нормированная плоскость размером 100×100, что требует пересчета реальных координат  $(x_{p_i}, y_{p_i})$ ,  $(x_{p_j}, y_{p_j})$  в относительные  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$ . Для этого используются следующие соотношения:

$$x_i = \frac{x_{p_i}}{x_{\max_i}} \cdot 100 \quad x_j = \frac{x_{p_j}}{x_{\max_j}} \cdot 100$$

$$y_i = \frac{y_{p_i}}{y_{\max_i}} \cdot 100 \quad y_j = \frac{y_{p_j}}{y_{\max_j}} \cdot 100$$

Таким образом, для построения модели использовались исходные данные представленные в табл. 1 и графики динамики энергопотребления и энергоснабжения, полученные по формулам (3) на основе статистических данных за 25 мая 2006г. (рис. 3).

Таблица 1

	Наименование	Относительные координаты	Средняя мощность, МВт
Потребители	Запорож. ЭС	(47;54,07)	4,27
	Каховская ГЭС	(47;54,07)	214,88
	Кировоградская ЭС	(53,75;96,29)	16,578
	Запорож. ГЭС	(75;96,29)	11,731
	Октябрьская	(5,5;57,4)	2,027
	Партизаны	(85;22,2)	0,32
	Алексеевка	(82,25;17,03)	10,614
	Берислав	(46,5;54,44)	4,587
	Виноградово	(32,5;25,1)	22,213
	Дудчино	(54,75;38,52)	12,69
	Карантинная	(23,5;40,74)	10,682
	Коммунальная	(34,81;33)	26,347

Потребители	Наименование	Относительные координаты	Средняя мощность, МВт
	КОС	(52;51,83)	12,679
	Новотроицк	(73,25;25,18)	8,435
	Никольская	(28,5;47,77)	6,533
	НКГПП	(46;50)	12,21
	П.Покровск	(13;51,11)	6,373
	Промбаза	(49,5;49,63)	11,612
	Рубановка	(67,25;64,81)	4,27
	СОС	(55;52)	4,803
	Тимофеевка	(74,5;34,44)	13,81
	Трифоновка	(48,75;80,37)	4,847
	ХТЭЦ	(24;43,33)	17,613
	ХНПЗ	(22;42,96)	17,936
	Цюрупинск	(27,75;41,11)	19,413
	Октябрьская	(5,5;57,4)	1,893

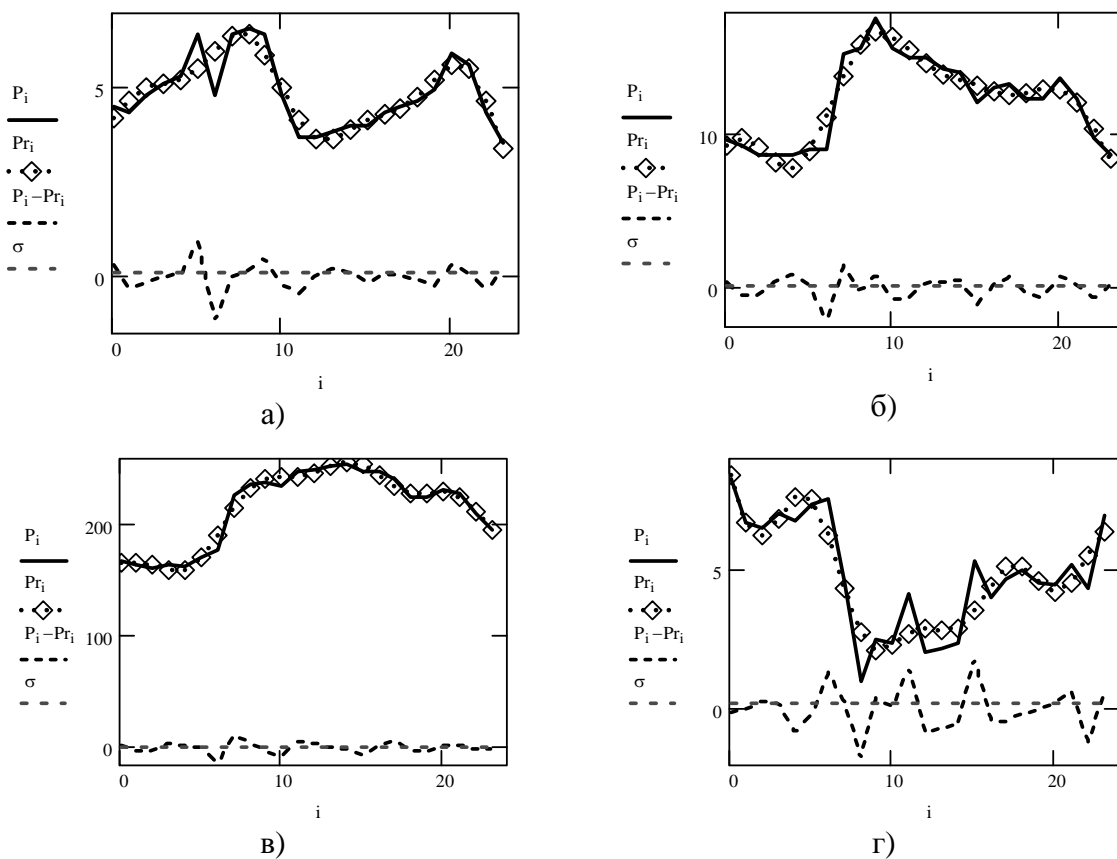


Рис. 3 – Типовые графики динамики нагрузки:  
 а) – Трифоновка; б) – НКГПП; в) – Каховская ГЭС; г) – Кировоградская ЭС.

Размещение источников и потребителей фрагмента ЭС Херсонской области, представленного на рис. 2, приведено на нормированной плоскости, на рис. 4.

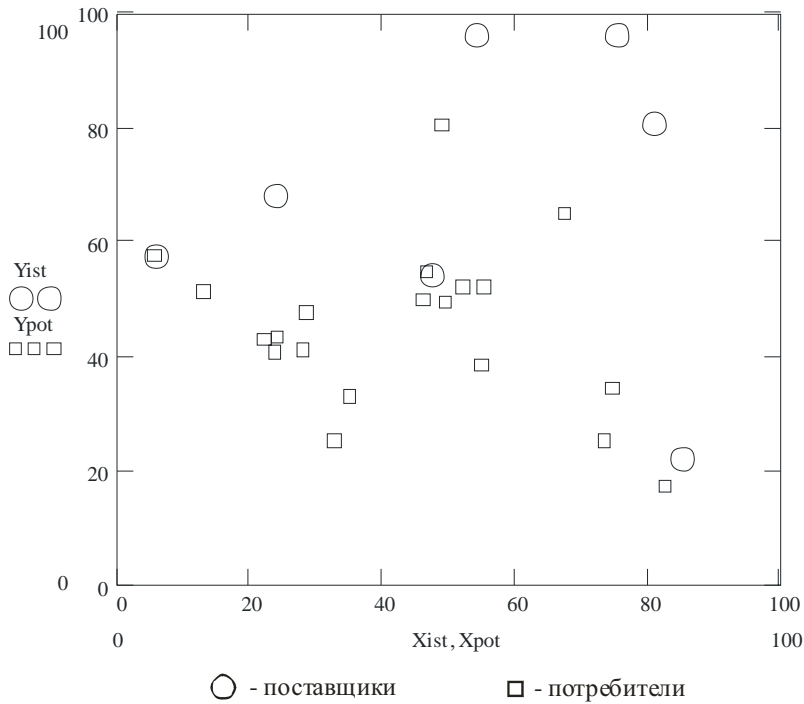
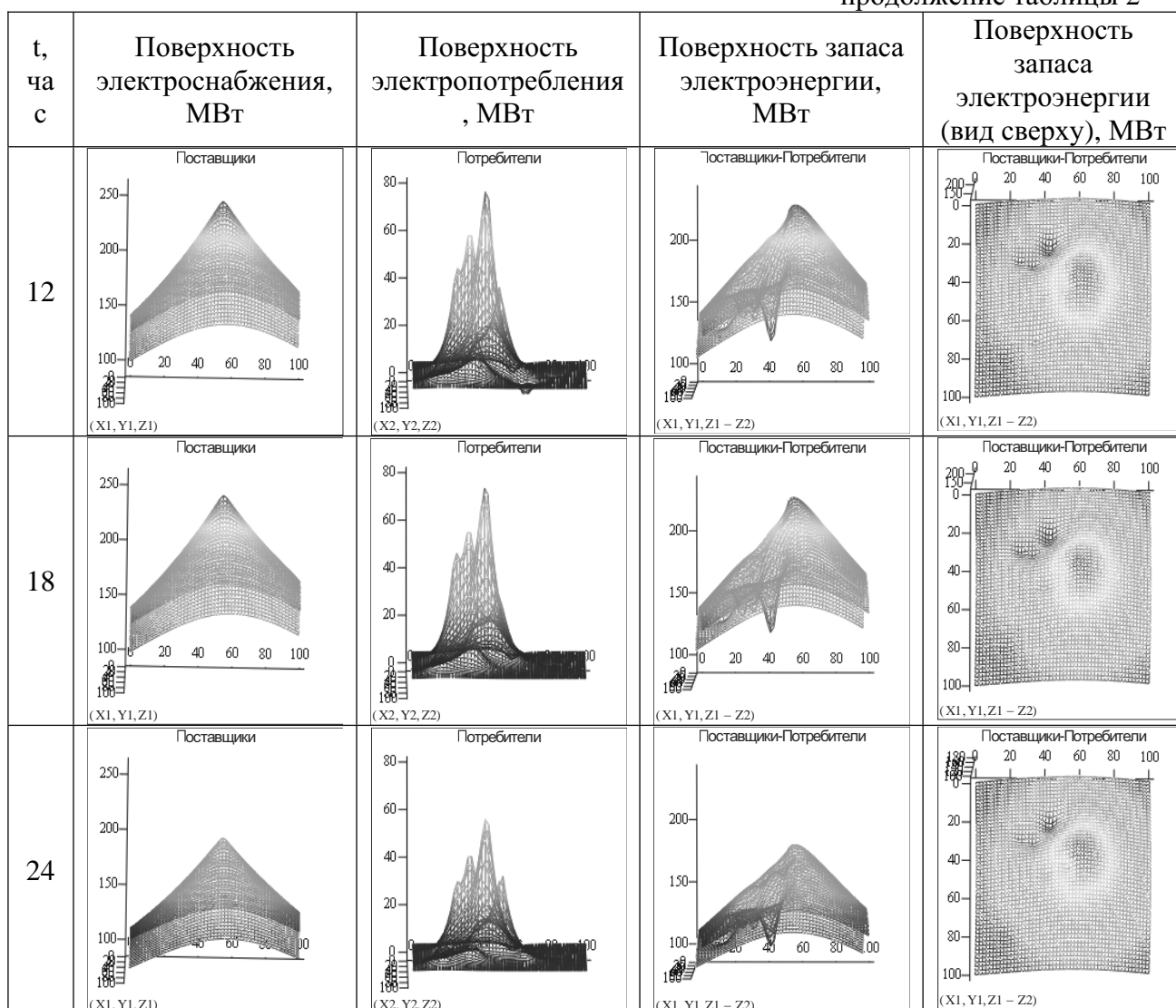


Рис. 4 – Расположение поставщиков и потребителей на нормированной плоскости

Моделирование динамического поведения фрагмента ЭС Херсонской области с учетом соотношений (1-3) выполнялось в среде компьютерного моделирования MathCAD 2000 [6]. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2

t, час	Поверхность электроснабжения, МВт	Поверхность электропотребления, МВт	Поверхность запаса электроэнергии, МВт	Поверхность запаса электроэнергии (вид сверху), МВт
1	<p>Поставщики</p> <p>(X1, Y1, Z1)</p>	<p>Потребители</p> <p>(X2, Y2, Z2)</p>	<p>Поставщики-Потребители</p> <p>(X1, Y1, Z1 - Z2)</p>	<p>Поставщики-Потребители</p> <p>(X1, Y1, Z1 - Z2)</p>
6	<p>Поставщики</p> <p>(X1, Y1, Z1)</p>	<p>Потребители</p> <p>(X2, Y2, Z2)</p>	<p>Поставщики-Потребители</p> <p>(X1, Y1, Z1 - Z2)</p>	<p>Поставщики-Потребители</p> <p>(X1, Y1, Z1 - Z2)</p>



Отсутствие “проколов” в поверхности запаса мощности свидетельствует о выполнении условия  $Z(x, y, t) > 0$  для  $t = 1, 24$ , что соответствует нормальному режиму работы энергосистемы в данный период.

*Выводы.* Динамическую непрерывную модель в виде поверхности запаса электроэнергии можно использовать как для прогноза состояния системы (нормального или критического режима работы), что необходимо для применения соответствующих методов управления, так и для проведения анализа новых изменений структуры энергосистемы в регионе.

По поверхности запаса электроэнергии можно судить, насколько каждый узел (район) рассмотренной энергосистемы обеспечен электроэнергией, и на основании этого принимать решения:

- о поднятии уровня электроснабжения целой энергосистемы, при возможности поднятия мощности генерирующих узлов;
- о перераспределении электроэнергии с районов с большим запасом электроэнергии в районы с малым запасом;
- об изменении топологии энергосистемы: за счет частичного отключения узлов (только в случаях аварийности режима энергосистемы) или при размещении новых потребителей в районе.

An article is devoted to the questions of development of dynamic model of distributing electric power in some local region taking into account dependence of power of energy consumption and energy supply from time. An improvement of continuous model of energy of distributing as a power supply surface by the possessing dynamics is lead. Results of design of distributing loading in grid of the Kherson region in the MathCAD environment are led.

1. Левин В.М., Мошкин Б.М. Управление электропотреблением энергетической системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - 88 с.
2. Методы оптимизации режимов энергосистем. /Под. ред. В. М. Горнштейна. — М.: Энергия, 1981. —336 с.
3. Головащенко Н.В., Рудакова Г.В. Энергосистема як об'єкт управління з фрактальною структурою. //ААЭКС, 2006 г. –№1(17). – с. 164-170.
4. Головащенко Н.В., Рудакова Г.В. Моделювання енергосистеми як об'єкта управління. //Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. 21-22 грудня 2005р. Миколаїв. – с.130-134.
5. Г.В. Рудакова, Н.В. Головащенко, В.П. Боярчук, В.В. Корчмід – Динамічна модель енергоспоживання в електроенергетичній системі. //Вестник ХНТУ, 2006г. – №2(25). – с. 422-427.
6. Дьяконов В.П. Энциклопедия MathCAD 2001i и MathCAD11. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 832с.

## ЕКОНОМІКА НАУЧНО-ТЕХНІЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

УДК 681.3.01

## ВИКОРИСТАННЯ ОБМЕЖУВАЛЬНО-ПРОДУКЦІЙНОГО МЕТОДА ПОДАННЯ ЗНАТЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ НЕСУПЕРЕЧНОСТІ НОРМАТИВНИХ АКТІВ НА ПРИКЛАДІ ФРАГМЕНТІВ ЗАКОНУ УКРАЇНИ “ПРО ПОДАТОК З ДОХОДІВ ФІЗИЧНИХ ОСІБ”

Сирота О.П.

Процеси створення несуперечливої нормативної бази і створення документів, що відповідають нормативній базі, потребують автоматизації при великому обсязі нормативної бази, великих обсягах документів та їх великій кількості. Автоматизація цих процесів спроможна знизити час підготовки нормативних актів, підвищити їх якість і знайти застосування, зокрема, у інформаційно-аналітичних системах в області законотворчої та юридичної діяльності та системах управління документообігом.

Задача автоматизації аналізу несуперечності потребує залучення спеціальних засобів моделювання нормативних актів, які дозволять проконтролювати несуперечність та відповідність. Для цієї задачі пропонується використати обмежувально-продукційний метод подання знань [1], який є розширюваним, дозволяє організувати повторне використання знань, інтегрувати можливості існуючих формальних моделей подання знань та контролювати несуперечність знань.

Мета статті – показати, як за допомогою обмежувально-продукційного методу подання знань можуть бути подані нормативні акти та проаналізована їх несуперечність. У якості приклада нормативного акту використано фрагменти Закону України “Про податок з доходів фізичних осіб” [2].

**Обмежувально-продукційний метод подання знань**

Обмежувально-продукційний метод подання знань (*Constraint-Production, CP-метод*) побудовано на ідеях семантичних мереж, що дозволяє інтегрувати у одному формалізмі різні методи подання знань (логіку предикатів першого порядку, продукційної моделі, об’єктний підхід). Метод є розширюваним, тобто дозволяє вводити нові конструкції для опису знань без зміни самого методу. Метод також надає механізм контролю цілісності, який дозволяє контролювати семантичні обмеження на сполучуваність знань.

Основним поняттям методу є *CP-модель*, в склад якої входять символи та слова на спеціальній внутрішній для методу мові подання знань. *CP-модель* може приєднувати інші створені раніше моделі, що реалізує повторне використання знань. В склад *CP-моделі* також може входити обмежувальна функція, яка призначена для контролю виконання семантичних обмежень.

Для реалізації різноманітних формальних моделей подання знань за допомогою *CP-методу* створюються основні *CP-моделі* (функціональна, логічна, продукційна, об’єктна). Ці *CP-моделі* вводять символи, які дозволяють використовувати для подання знань інтеграцію різноманітних формальних моделей, а саме формувати об’єкти, властивості, продукції, аксіоми тощо. Основні *CP-моделі* знань дозволяють задавати семантичні обмеження за допомогою областей визначення та значення, аксіом та інших конструкцій, та забезпечують контроль виконання цих семантичних обмежень.

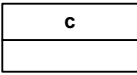
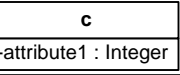
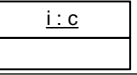
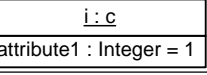
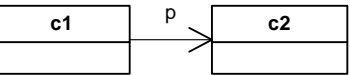
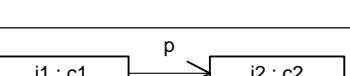
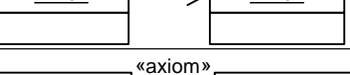
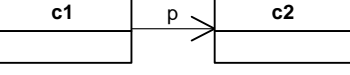

У разі, якщо виразних можливостей, які надаються основними *CP-моделями*, недостатньо, можливе створення нових *CP-моделей* із обмежувальними функціями, які контролюють визначену для моделей семантику.

**UML-нотація**

Для подання знань за допомогою *CP*-метода подання знань, використовуючи об'єктний підхід, аксіоми та продукції може бути використаний графічний спосіб, що ґрунтується на UML-нотації та використанні стереотипів [3]. Цей спосіб є зручним та лаконічним.

Умовні позначення та пояснення до них наведені у таблиці 1. Кожному позначенню відповідає сукупність виразів на спеціальній внутрішній мові подання знань.

Таблиця 1

Умовне позначення	Пояснення
	Концепт <i>c</i> .
	Концепт <i>c</i> та його цілочисельний атрибут <i>attribute1</i>
	Екземпляр <i>i</i> концепту <i>c</i> .
	Екземпляр <i>i</i> концепту та значення атрибуту <i>attribute1</i>
	Властивість <i>p</i> із областю визначення та областю значень. Область визначення – екземпляри концепту <i>c1</i> , область значень – екземпляри концепту <i>c2</i> .
	Екземпляри концептів <i>i1</i> , <i>i2</i> та екземпляр властивості <i>p</i>
	Аксіома. Для об'єктного підходу до подання знань аксіоми – це твердження, які розповсюджуються на всі екземпляри класу. На прикладі подано аксіому: властивість <i>p</i> , якщо вона виходить із концепту <i>c1</i> , має як область значень концепт <i>c2</i> .
	Відношення “не містить спільних екземплярів” між концептами <i>c1</i> та <i>c2</i> .
	Продукції (продукція може мати одну чи декілька посилки та одну чи декілька висновків).

### Організація знань у нормативних базах

Законодавчі нормативні акти будуються із статей, серед яких виділяють статтю “Визначення термінів”. В статті “Визначення термінів” задаються основні поняття та відношення, які регулюються нормативним документом. В інших статтях вводяться законодавчі положення, які регулюють взаємини визначених понять та відношень.

Тому законодавчі нормативні акти пропонується подавати як сукупність концептуальної та нормативних онтологій. Концептуальна онтологія задає визначення термінів, нормативні онтології задають законодавчі положення.

### Концептуальна онтологія фрагментів Закону України “Про податок з доходів фізичних осіб”

У статті 1 “Визначення термінів” Закону введено різноманітні терміни, взаємини між якими регулюються. Для подання цієї статті за допомогою *CP*-методу створюється *CP*-модель, яка подає ці терміни.

На рис. 1 за допомогою UML-нотації подано терміни “особа”, “резидент”, “нерезидент” тощо, введені відношення “податковий агент”, “об’єкт оподаткування”.

На рис. 2 подано терміни “дохід”, “іноземний дохід”, “дохід з території України”.

На рис. 3 подано терміни “загальний оподатковуваний дохід”, “загальний місця ний оподатковуваний дохід”, “загальний річний оподатковуваний дохід”, “податковий кредит”.



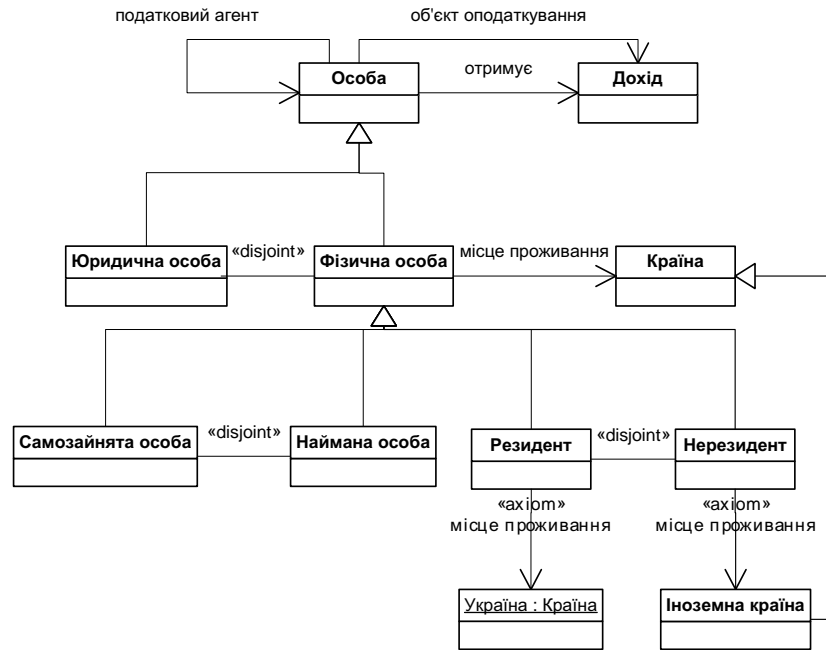


Рис. 1 Термін “особа” та його різновиди із статті 1

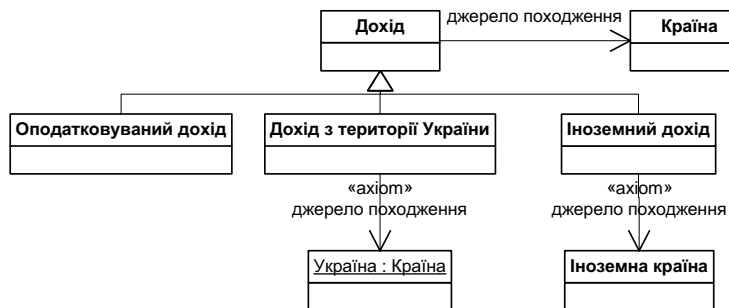


Рис. 2 Термін “дохід” та його різновиди із статті 1

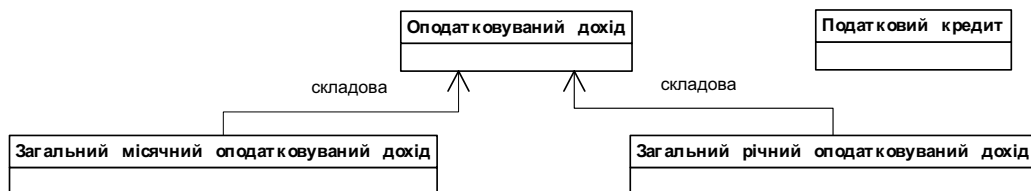


Рис. 3 Терміни “оподатковуваний дохід” та “податковий кредит” із статті 1

### Нормативна онтологія фрагменту Закону України “Про податок з доходів фізичних осіб”

Подамо нормативну онтологію на прикладі фрагменту статті 3 “Об’єкт оподаткування”, яка регулює відношення “об’єкт оподаткування”. Для подання цієї статті за допомогою SP-методу створюється SP-модель, яка подає наступний фрагмент:

“3.1. Об’єктом оподаткування резидента є:

3.1.1. загальний місячний оподатковуваний дохід;

3.1.2. чистий річний оподатковуваний дохід, який визначається шляхом зменшення загального річного оподаткованого доходу на суму податкового кредиту такого звітного року;

...

3.1.4. іноземні доходи.”

Ці положення подані на рис. 4.

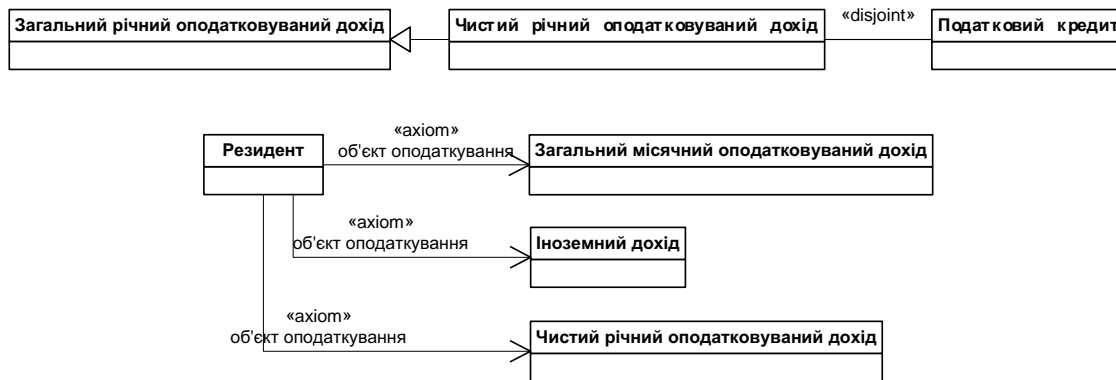


Рис. 4

### Контроль несуперечності нормативних документів

Контроль несуперечності нормативних документів, поданих за допомогою *СР*-методу подання знань, виконується автоматично на етапі створення *СР*-моделей знань. Спрацьовують обмежувальні функції основних *СР*-моделей, які контролюють семантичні обмеження.

У разі повторного використання знань та підключення нормативних актів до інших документів автоматично буде контролюватися несуперечність цих документів відносно нормативної бази.

Так, Закон України “Про оподаткування фізичних осіб” постулює, що об’єктом оподаткування резидента є, серед інших, чистий річний дохід. Це означає, що об’єктом оподаткування не може бути податковий кредит. У разі створення такого факту у *СР*-моделі документу спрацює механізм контролю цілісності, який виявить невиконання області значень відношення “об’єкт оподаткування”.

### Висновки

В даній статті на прикладі фрагментів Закону України “Про оподаткування фізичних осіб” показано, що обмежувально-продукційний метод подання знань придатний для подання нормативних актів та аналізу їх несуперечності. Подані за допомогою цього методу нормативні положення можуть бути повторно використані при створенні інших нормативних актів, при чому буде контролюватися несуперечність всіх документів, що між собою пов’язані.

Підходи, викладені в даній статті, дозволяють створити моделі знань нормативних актів та використати їх у інформаційно-аналітичних системах в області законотворчої та юридичної діяльності та системах управління документообігом.

Подальші дослідження слід проводити у напрямку автоматизації заповнення моделей знань нормативних положень із текстів на природній мові.

The paper is dedicated to automation of statutory act consistency analysis. This task requires special methods of statutory act modeling. It is proposed to use constraint-production knowledge-representation method. It is demonstrated that the method can be used for statutory act representation and consistency analysis. The fragments of The Law of Ukraine “About individual person income tax” are cited as sample. The stated approaches may be used in legislative and juridical information-analytic systems and document management systems.

1. О.П. Сирота. Обмежувально-продукційний метод подання знань для аналізу несуперечності текстів. // Искусственный интеллект. - 2004. - № 3. - с. 660-667.

2. Закон України “Про податок з доходів фізичних осіб”. <http://www.rada.gov.ua>.

3. Грейди Буч, Джеймс Рамбо, Айвар Джекобсон. UML. Руководство пользователя. 2000, Москва, ДМК. 432 стр.

## ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДРОБНО-ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Пляшкевич Е.Н.

Построение современного информационного сообщества требует разработки, внедрения и использования новых информационных технологий, которые обеспечивают высокий уровень принятия соответствующих решений в различных направлениях управленческой деятельности. Одним из главных направлений является повышение эффективности функционирования предприятий, осуществляемое путем построения автоматизированных систем управления и использования современных информационных технологий. Нахождение оптимальных управлений, определяющих наибольшую эффективность результатов функционирования, предусматривает построение моделей объектов управления, а также решение многошаговой задачи нахождения оптимальных управлений при заданном функционале эффективности функционирования.

Построение информационных моделей и технологий, на основе использования принципа оптимизации и законов сохранения валового продукта для создания автоматизированных систем, позволило найти модель предприятия с помощью дробно-линейного программирования.

В некоторых практических задачах критерий принятия решений описывается отношением двух экономических или технических параметров. Например, рентабельность определяется как отношение между прибылью и затратами. В таких ситуациях необходимо принимать решение с целью максимизации или минимизации отношения двух параметров. Если каждый из них математически описывается линейной функцией, то в таких случаях необходимо найти экстремум (максимум или минимум) отношения двух линейных функций. Отношение двух линейных функций называют дробно-линейной целевой функцией. Задача оптимизации дробно-линейной функции при линейных ограничениях называется задачей дробно-линейного программирования. Как правило, при максимизации отношения двух экономических показателей, показатель числителя стремится достичь максимальное возможное значение, а показатель знаменателя - минимальное. При минимизации - наоборот. Если оптимизировать каждый показатель в отдельности, решая две задачи линейного программирования, одну на максимум, а другую на минимум линейных функций, являющихся соответственно числителем и знаменателем дробно-линейной целевой функции, то полученные оптимальные решения не могут быть использованы для определения оптимального решения отношения этих двух показателей.

Таким образом при изучение задач с дробно-линейными критериями необходимо исследовать новый класс задач оптимизации - задачи дробно-линейного программирования. Как будет показано в дальнейшем, для исследования задач дробно-линейного программирования можно использовать общую теорию линейного программирования.

Задачу дробно-линейного программирования (ДЛП) можно записать в виде:

$$F(x) = \frac{C(x)}{D(x)} = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j}{\sum_{j=1}^n d_j x_j} \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = \overline{1, m}); \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, n}). \quad (3)$$

Обозначим через  $R(x)$  многогранное выпуклое множество, заданное ограничениями (2)-(3), т.е.

$$R(x) = \left\{ x / \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = \overline{1, m}); x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, n}) \right\},$$

и предположим, что  $R(x)$  ограничено.

Для решения (1)-(3) используются различные численные методы, которые, как правило, основаны на предположении, что  $D(x) > 0$  для любых  $x \in R(x)$ , и следующих утверждениях.

На любом прямолинейном отрезке, принадлежащем многограннику  $R(x)$ , дробно-линейная функция  $F(x)$  изменяется монотонно.

Дробно-линейная функция  $F(x)$  достигает минимума (максимума) только в крайней точке многогранника  $R(x)$ . Если минимум (максимум) достигается в нескольких крайних точках, то он достигается и на их выпуклой оболочке.

Из этих двух теорем следует, что оптимальное решение дробно-линейной задачи достигается в крайних точках многогранника допустимых решений.

Дадим геометрическую интерпретации задачи ДЛП. Для этого рассмотрим задачу ДЛП с двумя переменными

$$F(x_1, x_2) = \frac{C(x_1, x_2)}{D(x_1, x_2)} = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2}{d_1 x_1 + d_2 x_2} \rightarrow \max;$$

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 \leq b_1,$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 \leq b_2,$$

.....

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 \leq b_m,$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$$

Допустим, что система ограничений данной задачи определяет замкнутый многоугольник, который задает множество допустимых решений  $R(x)$  данной системы линейных неравенств, и предположим, что  $D(x_1, x_2) > 0$  для любой точки из  $R(x)$ . Это означает, что линия  $L_0$  с уравнением  $d_1 x_1 + d_2 x_2 = 0$  не пересекает многоугольник  $R(x)$ .

Обозначим через  $z$  значение целевой функции

$$z = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2}{d_1 x_1 + d_2 x_2}.$$

Тогда  $x_2 = \frac{c_1 - z d_1}{z d_2 - c_2} \cdot x_1$  или  $x_2 = k x_1$ , где  $k = \frac{c_1 - z d_1}{z d_2 - c_2}$ .

Геометрически, уравнение  $x_2 = k x_1$  задает прямую  $L$ , проходящую через начало координат с угловым коэффициентом  $k$ . Угловой коэффициент  $k$  зависит от значения функции  $z$ , т.е. если фиксировать значение функции  $z$ , то угловой коэффициент  $k$  прямой  $x_2 = k x_1$  примет конкретное значение и прямая займет определенное положение. При изменении значения функции  $z$  изменится и значение коэффициента  $k$ , а прямая  $L$  будет менять свое положение проходя через начало координат. Множество прямых  $L$  при изменении  $z$  образует пучок прямых проходящих через начало координат. Уравнение пучка будет  $x_2 = k(z) x_1$ .

Из приведенной геометрической интерпретации задачи ДЛП при  $p=2$  следует графический метод решения задач ДЛП с двумя переменными. Этот метод включает следующие этапы:

1. Строим область допустимых решений  $R(x)$ .
2. Устанавливаем направление вращения прямой пучка при возрастании величины  $z$  по знаку величины  $\Delta = d_1c_2 - c_1d_1$ . При  $\Delta > 0$  вращение осуществляем против часовой стрелки, а при  $\Delta < 0$  по часовой стрелке.
3. В зависимости от того ищем минимум или максимум целевой функции задачи ДЛП находим либо ту прямую пучка, которая первая касается области  $R(x)$  по установленному направлению вращения и соответствующую точку касания, либо прямую пучка, которая последней касается области  $R(x)$  и соответствующую точку касания.
4. Определяем координаты точки касания (точки минимума или максимума) и вычисляем значение целевой функции в этой точке ( $z_{\min}$  или  $z_{\max}$ ).

Допустим, предприятие производит два вида продукции А и В, используя два вида ресурсов: сырье и оборудование. Данные приведены в табл.1. Предприятие имеет суммарный заказ на производство 7 единиц продукции.

Таблица 1

Ресурсы	Нормы затрат		Объем ресурса
	А	В	
Сырье (т)	2	1	12
Оборудование (ч)	1	2	12
Затраты на производство одной единицы продукции (тыс.грн.)	2	3	

Определить сколько единиц продукции каждого вида следует предприятию производить, чтобы себестоимость одной единицы продукции было наименьшей.

Модель задачи

$$\begin{aligned}
 2x_1 + x_2 &\leq 12, \\
 x_1 + 2x_2 &\leq 12, \\
 x_1 + x_2 &\geq 7, \\
 x_1 &\geq 0, x_2 &\geq 0. \\
 z = \frac{2x_1 + 3x_2}{x_1 + x_2} &\rightarrow \min,
 \end{aligned}$$

где  $x_1$  и  $x_2$  объемы выпуска продукции, а  $z$  - себестоимость единицы продукции.

Решая задачу графически (рис.1) получим следующий результат; минимум достигается в точке  $C(5; 2)$  и  $z_{\min} = 16/7 = 2,286$  тыс. грн.

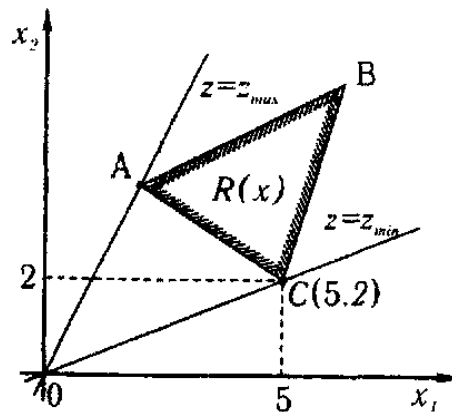


Рис.1 Графическое решение задачи

Более простой графический метод решения дробно-линейной задачи включает только следующие этапы:

- строим область  $R(x)$  допустимых решений;
- вращением прямой  $L$  вокруг начало координат находим точки касания прямой  $L$  с множеством  $R(x)$  допустимых решений;
- находим координаты этих найденных точек;
- вычисляем значения дробно-линейной функции в найденных точках;
- СРАВНИВАЯ ЗНАЧЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ В ЭТИХ ТОЧКАХ, ОПРЕДЕЛЯЕМ В КАКОЙ ИЗ НИХ МИНИМУМ, А В КАКОЙ МАКСИМУМ.

Рассмотрим случай задачи дробно-линейного программирования, когда в числителе и знаменателе имеются свободные члены  $c_0$  и  $d_0$ . Тогда функции  $C(x)$  и  $D(x)$  имеют вид

$$C(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j + c_0, \quad D(x) = \sum_{j=1}^n d_j x_j + d_0.$$

В таком случае задача ДЛП может быть записана в виде:

$$F(x) = \frac{C(x)}{D(x)} = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j + c_0}{\sum_{j=1}^n d_j x_j + d_0} \rightarrow \max; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = \overline{1, m}); \quad (5)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, n}). \quad (6)$$

Следует иметь ввиду, что в результате соответствующих преобразований задача ДЛП (1)-(3) может быть приведена к виду (4)-(6). Также при необходимости задача ДЛП (4)-(6) может быть преобразована в виде задачи (1)-(3).

Рассмотрим графический метод решения неоднородной задачи ДЛП вида

$$\max z = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_0}{d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_0} \quad (7)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2, \\ \dots\dots\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 \leq b_m, \end{cases} \quad (8)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \quad (9)$$

Пусть множество ограничений (8)-(9) задачи определяет выпуклый многоугольник  $R(x)$ , а  $d_1x_1+d_2x_2+d_0>0$ , любой точки из  $R(x)$ . Это означает, что линия  $L$  с уравнения  $d_1x_1+d_2x_2+d_0=0$  не пересекает многоугольник  $R(x)$ .

Возможны два варианта применения графического метода решения неоднородной задачи ДЛП.

Вариант 1. Делаем замену переменных по формулам

$$\begin{cases} x_1 = y_1 + \alpha, \\ x_2 = y_2 + \beta, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  находятся как решение системы уравнений

$$\begin{cases} c_1\alpha + c_2\beta + c_0 = 0, \\ d_1\alpha + d_2\beta + d_0 = 0 \end{cases}$$

по формулам  $\alpha = \frac{c_2d_0 - d_2c_0}{c_1d_2 - c_2d_1}$ ,  $\beta = \frac{d_1c_0 - c_1d_0}{c_1d_2 - c_2d_1}$ .



Используем графический метод решения задачи в системе координат  $x_1Ox_2$ .

- Находим по соответствующим формулам  $\alpha = 2$  и  $\beta = -1$ .
- Построим многоугольник OABCD.
- Берем точку вращения линий уровня точку P(2, -1).

- Выразим  $x_2$  через  $x_1$  из первоначального выражения  $z = \frac{3x_1 + 2x_2 - 4}{2x_1 + 5x_2 + 1}$  и

получим  $x_2 = \frac{-2z+3}{5z-2}x_1 - \frac{z+4}{5z-2}$ .

- Находим для  $k(x) = \frac{-2z+3}{5z-2}$  производную по z

$$\frac{\partial k}{\partial z} = \frac{-11}{(5z-2)^2} < 0.$$

- Вращаем линию уровня по часовой стрелке с центром в точке P(2,-1).
- ПЕРВАЯ ТОЧКА КАСАНИЯ O(0,0) С МНОГОУГОЛЬНИКОМ R(X) БУДЕТ ТОЧКОЙ МИНИМУМА, ДЛЯ КОТОРОЙ ИМЕЕМ  $X_1^* = 0$ ,  $X_2^* = 0$  И  $Z_{\min} = -4$ .

- Последняя точка D(2,0) пересечения линии уровня с многоугольником R(x) будет точкой максимума, для которой имеем  $x_1^* = 2$ ,  $x_2^* = 0$  и  $z_{\min} = -7/12$ .

При решении оптимизационных задач, когда ищется минимум или максимум функции, как правило, предполагается, что область допустимых решений является ограниченным множеством и в таких случаях всегда достигаются оптимальные решения. Однако, на практике, встречаются случаи когда область допустимых решений является неограниченным множеством. В таких случаях, например, для задачи линейного программирования возможны следующие варианты решения:

- минимум или максимум достигаются в крайних точках, т.е. линейная функция принимает ограниченные значения на неограниченном множестве.

• МИНИМУМ ИЛИ МАКСИМУМ НЕ ДОСТИГАЕТСЯ В КОНКРЕТНОЙ [КРАЙНЕЙ ТОЧКЕ, Т.Е. ЛИНЕЙНАЯ ФУНКЦИЯ, В СЛУЧАЕ МИНИМУМА ИЛИ МАКСИМУМА, ЯВЛЯЕТСЯ НЕОГРАНИЧЕННОЙ НА НЕОГРАНИЧЕННОМ МНОЖЕСТВЕ. В ТАКИХ СЛУЧАЯХ ГОВОРЯТ, ЧТО ЗАДАЧА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ НЕРАЗРЕШИМОЙ, Т.Е. НЕ МОГУТ БЫТЬ НАЙДЕНЫ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ, КОТОРЫЕ ДОСТАВЛЯЮТ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ. ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ ЯВЛЯЕТСЯ НЕОГРАНИЧЕННОЙ.

В общем случае, когда задана некоторая задача ДЛП возможны различные случаи.

1. Многогранник допустимых решений является ограниченным. Тогда минимальное и максимальное значения дробно-линейной функции достигается в крайних точках многогранника. Таким образом задача ДЛП разрешима, применяя любой метод.

2. Многогранник допустимых решений является неограниченным множеством. В таком случае возможны следующие ситуации:

а) дробно-линейная функция достигает свои минимальное максимальное значения в крайних точках, т.е. является ограниченной функцией на неограниченном множестве. Задача ДЛП разрешима и целевая дробно-линейная функция ограничена;

б) дробно-линейная функция не может достигнуть своего минимального или максимального значение в конкретной точке многогранника, в силу того, что она убывает или возрастает с непрерывным ростом значений переменных. В такой ситуации задача ДЛП имеет минимум (максимум) в конкретной точке многогранника R(x), а максимум (минимум) является асимптотическим, который может быть как конечным, так и бесконечным. Задача ДЛП разрешима на минимум (максимум) и неразрешима на максимум (минимум) в случае бесконечного асимптотического экстремума. Целевая дробно-линейная функция в одном случае ограничена, а в другом - неограничена;



в) дробно-линейная функция принимает свое минимальное или максимальное значение асимптотически, т.е. при изменении значений переменных одна из гиперплоскостей дробно-линейной функции принимает положение параллельно одной грани, которая дает асимптотический максимум, а другая из ее гиперплоскостей принимает положение параллельно к другой грани, которая дает асимптотический минимум. Так как асимптотические экстремумы могут быть конечными или бесконечными, то и задача ДЛП может быть разрешимой или неразрешимой.

Таким образом, любой метод решения задачи ДЛП должен обеспечить проведение анализа всех возможных случаев и иметь критерий их обнаружения.

The tasks of the administrative decisions are considered on the basis of fractional linear programming, and also methods of their decision. The geometrical interpretation and graphic method of the decision is offered. The non-uniform task of fractional linear programming is decided.

1. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 368 с.
2. Багриновский К.А., Бендиков М.А., Хрусталеv Е.Ю. Современные методы управления технологическим развитием. – М.: РОССПЭН. – 2001. - 271 с.
3. Евланов А.Н. Теория и практика принятия решений. – М.: Наука, 1982. – 159 с.
4. Информационно-вычислительные системы принятия решений/ В.В.Хаджинов, В.А. Быков, И.А. Храмова, В.Г. Усачев. – К.: Наукова думка, 1992. – 140 с.
5. Марасанов В.В. Динамическое моделирование. – Херсон: Айлант, 1999.– 105 с.
6. Марасанов В.В., Пляшкевич Е.Н. Основы теории проектирования и оптимизации макроэкономических систем. – Херсон: Айлант, 2002. – 190 с.
7. Марасанов В.В. Элементы теории управленческих решений. – Херсон: Колос, 2002. – 72 с.

## РЕФЕРАТЫ

**Китаев А.В., Сушич Е.Ф.** Приложение положений теории дросселя и трансформатора к расчету и анализу электромагнитом переменного тока. – С. 6 – 13.

В работе показано, что рассматривая электромагниты переменного тока в рамках единого семейства таких электротехнических устройств, как дроссели и трансформаторы, можно построить их анализ в простой и компактной форме. Тем самым достигается связь таких научных направлений, как "Электрические аппараты" и ТОЭ на основе принципов системности и преемственности.

**Попруга А.Г.** Теоретические и экспериментальные исследования электрических нагревателей по критерию экономии энергии. – С. 14 – 23.

В статье на основе теории Максвелла, теоремы Пойнтинга-Умова, уравнения и функций Бесселя разработана математическая модель для определения активного и внутреннего индуктивного сопротивлений цилиндрического провода нагревателя. Для подтверждения адекватности математической модели приведены результаты экспериментов по определению активного, индуктивного сопротивлений, магнитной проницаемости, удельной проводимости нихромовых проводов двух различных диаметров.

**Гернова Т.І.** Урахування морфогенетичного рівняння в математичній моделі тканини. – С. 24 – 32.

У даній статті розглянуті питання побудови математичної моделі тканини з урахуванням технології ткацтва. Проаналізовано моделі руху, що породжують топологію переплетення ниток у тканинах. Отримано математичну модель тканини, що враховує топологію переплетення ниток.

**Тулученко Г.Я.** Інформаційний модуль експрес-пошуку точок еквівалентності процесу нейтралізації. – С. 33 – 37.

В статті наведено опис математичного та алгоритмічного забезпечення інформаційного модуля експрес-пошуку точок еквівалентності процесу нейтралізації. Показані приклади його практичного використання.

**Шпильовий Л.В.** Математична модель та алгоритм екстремального управління процесом осадження дисперсної фази суспензії. – С. 38 – 44.

В роботі розроблено і проаналізовано регресійну модель процесу осадження дисперсної фази хвостів збагачення цирконових руд Маріупольського родовища, та запропоновано алгоритм екстремального управління дозуванням флокулянта у згущувач.

**Казак В.М., Гальченко С.М., Завгородній С.О.** Аналіз можливості застосування імовірнісних методів розпізнавання для виявлення пошкоджень зовнішнього обводу літака. – С. 45 – 51.

В роботі проведено дослідження імовірнісних методів розпізнавання та аналіз можливості їх застосування з метою розпізнавання стану зовнішнього обводу літального апарату в польоті.

**Квасников В.П., Баранов А.Г.** Анализ влияния дестабилизирующих факторов на работу биканальной координатно-измерительной машины. – С. 52 – 56.

В статье описаны оптимальные условия работы биканальной координатно-измерительной машины, необходимые для проведения точных измерений, показано, что стабильность скорости перемещения ползуна является функцией частоты возбуждаемых колебаний и мало зависит от параметров системы.

**Крылов В.Н., Полякова М.В., Волкова Н.П.** Контурная сегментация в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования с использованием математической морфологии. – С. 57 – 63.

С помощью гиперболического вейвлет-преобразования. повышена помехоустойчивость метода Канни контурной сегментации изображений.

**Мороз В. В.** R-D проблема и эффективность систем сжатия изображений. – С. 64 – 69.

Отношение интенсивности кодирования к уровню искажения является ключевой задачей в системах сжатия изображений. Для повышения эффективности систем сжатия предлагается поиск оптимального соотношения интенсивности к искажению. Поиск осуществляется путем использования вложенного кодирования со сменой порядка сканирования вейвлетных коэффициентов для усечения наименее значимых бит.

**Кирюшатова Т.Г., Григорова А.А** Влияние направленности отдельных операторов и направленности всей группы на конечный результат выполнения поставленной задачи. – С. 70 – 72

Статья посвящена методам формирования коллективов с учетом направленности отдельных членов коллектива, а также группы операторов в целом. Приведены формулы расчета необходимых коэффициентов для эффективной работы групп операторов. Даны рекомендации для объединения операторов в группы.

**Коршевиюк Л.О.** Застосування комітетами експертів системи нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю.. – С. 73 – 79.

Розглядається застосування систем нечіткого логічного виводу до розв'язання багатокритеріальних задач прийняття рішень із залученням комітетів експертів. Запропоновано використання для комітету експертів єдиної бази правил системи нечіткого логічного виводу із зваженою істинністю, що забезпечує врахування індивідуальних значень вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання об'єктів для кожної ОПР, знімає необхідність побудови і використання персональних баз правил для кожної ОПР, і робить системи НЛВ практично застосовним засобом в реальних задачах прийняття рішень.

**Пономаренко Л.А., Меликов А.З., Нагиев Ф.Н.** Анализ системы обслуживания с различными уровнями пространственных и временных приоритетов. – С. 80 – 91.

Предложен численный метод расчета характеристик одноканальной системы обслуживания с различными уровнями приоритетов. В ней заявки реального времени имеют низкие пространственные и высокие временные приоритеты, а заявки нереального времени, наоборот, имеют высокие пространственные и низкие временные приоритеты. Даны результаты соответствующих вычислительных экспериментов.

**Сідлецький В.М., Ельперін І.В., Ладанюк А.П.** Розробка алгоритмів підсистеми підтримки прийняття рішень для контролю якості роботи дифузійного відділення. – С. 92 – 97.

В статті розглядається алгоритм пошуку рішень та підходи до створення бази знань, що використовуються для розробки підсистеми підтримки прийняття рішень, при управлінні якісними показниками роботи дифузійної станції.

**Ускач А.Ф., Гогунский В.Д., Яковенко А.Е.** Модели задачи распределения в теории расписания. – С. 98 – 104.

В статье рассматриваются методы построения моделей задачи распределения в теории расписания с целью определения наиболее применимого метода.

**Песчанский А.И.** Оптимальное техническое обслуживание двухкомпонентной параллельной системы с учетом наработки каждого элемента. – С. 105 – 112.

Построена полумарковская модель технического обслуживания дублированной системы с нагруженным резервом с учетом суммарной наработки на отказ каждого элемента. Найдены стационарные показатели качества функционирования системы, определены оптимальные величины наработок элементов для проведения предупредительного технического обслуживания.

**Рябкин Ю.В., Карнаух В.В.** Квазиоптимальная обработка коротких радиоимпульсов в акустооптическом спектроанализаторе. – С. 113 – 116.

Рассматривается способ повышения эффективности акустооптического преобразования, учитывающий нелинейные эффекты, возникающие при прохождении коротких радиоимпульсов. Приведен квазиоптимальный алгоритм пространственно–временной обработки сигнала приемником нестационарных радиосигналов. Получены данные работоспособности алгоритма и оценки выигрыша его использования при коротких длительностях наблюдаемых радиоимпульсов.

**Смітюх Я.В., Кишенько В. Д.** Оптимізація управління процесами брагоректифікації. – С. 117 – 124.

В статті пропонується методика вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації. В контексті вирішення поставленої задачі розглядається математична модель та критерії на основі яких здійснюється пошук оптимальних рішень по управлінню.

Для вирішення задачі пропонується нейро-генетичний алгоритм багатокритеріальної оптимізації на основі сценаріїв, як моделей змінювання параметрів процесу, що визначається на дискретному часовому просторі із заданим часовим кроком.

**Клименко А.К.** Об оптимизации коэффициента усиления в адаптивной системе с обратной моделью. – С. 125 – 131.

Рассматривается вопрос определения оптимального коэффициента усиления в системе с адаптивной корректировкой циклически повторяющихся управляющих воздействий. В цепи адаптации используется обратная модель. Объект управления подвержен воздействию случайных возмущающих воздействий, параметры которых могут быть как постоянными, так и изменяющимися во времени.

**Кучеров Д.П.** Синтез адаптивной квазиоптимальной по быстродействию системы управления при входном воздействии вида квадратичной функции и наличии ограниченных помех. – С. 132 – 140.

Предлагается методика синтеза адаптивной квазиоптимальной по быстродействию следящей системы. Особенностью методики является применение процедуры обучения распознавания образов совместно с процедурой точечного оценивания. Рассматриваемый подход позволяет значительно повысить эффективность процедуры адаптации.

**Івологіна Т.О.** Енергетичний підхід до аналізу стійкості руху вимірювальної головки координатно-вимірювальної машини. – С. 141 – 144.

На прикладі рівнянь збуреного руху зі сталими коефіцієнтами розглянута структура узагальнених сил по їх відношенню до процесу перетворення енергії та запропонований спосіб побудови функції Ляпунова

**Левченко А.А., Кравчук О.И.** Эквивалентный макромодуль процесса технического обслуживания радиотехнических средств.. – С. 145 – 149.

В статье рассмотрено использование макромодулей процесса технического обслуживания радиотехнических средств. Последовательное соединение таких макромодулей позволяет моделировать процесс обслуживания на любом интервале времени и в течение всего срока эксплуатации.

**Пономарьов Я.Ю., Ладанюк А.П., Іващук В.В.** Досвід використання нечітких регуляторів в системі атоматизації випарної установки. – С. 150 – 153.

В статті розглядається проблема технологічних комплексів з наявністю процесів фізико-хімічних перетворень. Для реалізації методу ідентифікації розроблений алгоритм селекції сигналів на основі вейвлет-перетворення, розроблений метод оцінки характеристик залежності, що спостерігається, алгоритм побудови нелінійних моделей певної поведінки, переваги яких підтверджуються результатами імітаційного моделювання та впровадженням на промислових підприємствах.

**Федоровский К.Ю., Владецкий Д.О.** Интенсификация теплоотвода замкнутых систем охлаждения энергоустановок морских технических средств. – С. 154 – 158.

Приведены результаты визуальных исследований течения газожидкостных струй и интенсификации теплоотдачи с использованием этих струй в погружных пластинчатых теплообменных аппаратах замкнутых систем охлаждения. Исследован кризис теплоотвода в данных условиях.

**Боярчук В.П., Головащенко Н.В., Рудакова А.В.** Динамическая модель распределения нагрузки в энергосистеме Херсонской области. – С. 159 – 166.

Статья посвящена вопросам разработки динамической модели распределения электроэнергии в некоторой локальной области с учетом зависимости мощности энергопотребления и энергоснабжения от времени. Проведено усовершенствование непрерывной модели энергораспределения в виде поверхности запаса мощности, обладающей динамикой. Приведены результаты моделирования распределения нагрузки в энергосистеме Херсонской области в среде MathCAD.

**Сирота О.П.** Використання обмежувально-продукційного метода подання знань для аналізу несуперечності нормативних актів на прикладі фрагментів Закону України “Про податок з доходів фізичних осіб”. – С. 167 – 170.

Стаття присвячена питанням автоматизації аналізу несуперечності нормативних актів. Ця задача потребує залучення спеціальних методів моделювання нормативних актів. Для розв’язання цієї задачі пропонується використати обмежувально-продукційний метод подання знань. В статті на прикладі фрагментів Закону України “Про податок з доходів фізичних осіб” показано, що цей метод придатний для подання нормативних документів, а також аналізу їх несуперечності. Підходи, викладені в статті, можуть бути використані у інформаційно-аналітичних системах в області законотворчої та юридичної діяльності та системах управління документообігом.

**Пляшкевич Е.Н.** Принятие управленческих решений на основе дробно-линейного программирования. – С. 171 – 177.

Рассмотрены задачи управленческих решений на основе дробно-линейного программирования, а также методы их решения. Предложена геометрическая интерпретация и графический метод решения. Решена неоднородная задача дробно-линейного программирования.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Баранов А.Г.** – Начальник подготовки производства ООО „Вектор Интерпрайзиз”, г. Киев.

**Боярчук В.П.** – Аспирант кафедры Технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

**Владецкий Д.О.** – Аспирант кафедры Энергоустановок морских судов и сооружений Севастопольского национального технического университета.

**Волкова Н.П.** – Старший преподаватель кафедры прикладной математики и информационных технологий в бизнесе Института бизнеса, экономики и информационных технологий Одесского национального политехнического университета.

**Гальченко С.Н.** – Старший преподаватель кафедры электроэнергетических систем Аэрокосмического института Национального авиационного университета.

**Гогунский В.Д.** – Профессор, заведующий кафедрой охраны труда и безопасности жизнедеятельности Одесского национального политехнического университета, доктор техн. наук.

**Головащенко Н.В.** – Аспирант, ассистент кафедры Технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

**Григорова А.А.** – Доцент кафедры «Экономическая кибернетика» Херсонского национального технического университета, кандидат техн. наук.

**Завгородний С.А.** – Директор Славянского колледжа Национального авиационного университета.

**Иващук В.В.** – Ассистент кафедры Автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Национального университета пищевых технологий.

**Иволгина Т.О.** – Аспирант Национального авиационного университета.

**Казак В.Н.** – Профессор, заведующий кафедрой электроэнергетических систем Аэрокосмического института Национального авиационного университета, доктор техн. наук.

**Карнаух В.В.** – Лауреат Государственной премии Украины, начальник научно-исследовательского отдела № 3 открытого акционерного общества «Специальное конструкторское бюро радиотехнических устройств».

**Квасников В.П.** – Профессор кафедры информационных технологий Национального авиационного университета, доктор техн. наук.

**Кирюшатова Т.Г.** – Доцент кафедры «Информационных технологий» Херсонского национального технического университета, кандидат техн. наук.

**Китаев А.В.** – Профессор кафедры энергетики и электротехники, Херсонского национального технического университета, кандидат техн. наук.

**Кишенько В. Д.** – Доцент кафедры Автоматизации и компьютерно – интегрированных технологий Национального университета пищевых технологий, кандидат техн. наук.

**Клименко А.К.** – Старший научный сотрудник, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Бердянского госпедуниверситета, кандидат техн. наук.

**Коршевнюк Л.О.** – Аспирант Национального технического университета Украины «КПИ», Институт прикладного системного анализа НАН Украины и Минобразования и науки Украины.

**Кравчук О.И.** – Преподаватель кафедры тактики общевойскового факультета Одесского ордена Ленина института Сухопутных войск.

**Крылов В.Н.** – Профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий в бизнесе Института бизнеса, экономики и информационных технологий Одесского национального политехнического университета, доктор техн. наук.

**Кучеров Д.П.** – Старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, кандидат техн. наук.

**Ладанюк А.П.** – Профессор, заведующий кафедрой Автоматизации и компьютерно – интегрированных технологий Национального университета пищевых технологий.

**Левченко А.А.** – Заместитель начальника кафедры боевого применения подразделений военной разведки и специального назначения Одесского ордена Ленина института Сухопутных войск, кандидат техн. наук.

**Меликов А.З.** – Доктор техн. наук.

**Мороз В. В.** – Доцент, Одесский национальный политехнический университет, кандидат техн. наук.

**Нагиев Ф.Н.** – кандидат техн. наук.

**Песчанский А.И.** – Доцент кафедры высшей математики, Севастопольский национальный технический университет (СевНТУ), кандидат физ.-мат. наук.

**Пляшкевич Е.Н.** – Доцент кафедры экономической кибернетики Херсонского государственного аграрного университета, кандидат техн. наук.

**Полякова М.В.** – Доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий в бизнесе Института бизнеса, экономики и информационных технологий Одесского национального политехнического университета, кандидат техн. наук.

**Пономарёв Я.Ю.** – Национальный университет пищевых технологий.

**Пономаренко Л.А.** – Заведующий техническим отделом ВАК Украины, доктор техн. наук.

**Попруга А.Г.** – Доцент кафедры «Технической кибернетики» Херсонского национального технического университета, кандидат техн. наук.

**Рудакова А.В.** – Доцент кафедры Технической кибернетики Херсонского национального технического университета, кандидат техн. наук.

**Рябкин Ю.В.** – Лауреат Государственной премии Украины, Заслуженный машиностроитель Украины, председатель правления открытого акционерного общества «Топаз».

**Сидлецкий В.М.** – Аспирант, ассистент кафедры Автоматизации и компьютерно – интегрированных технологий Национального университета пищевых технологий.

**Сирота О.П.** – Аспирант Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».

**Смитюх Я.В.** – Ассистент кафедры Автоматизации и компьютерно – интегрированных технологий Национального университета пищевых технологий.

**Сушич Е.Ф.** – Студентка 3 курса кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».

**Терновая Т.И.** – Старший преподаватель кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

**Тулученко Г.Я.** – Доцент кафедры высшей математики Херсонского национального технического университета, кандидат техн. наук.

**Ускач А.Ф.** – Аспирант Одесского национального политехнического университета.

**Федоровский К.Ю.** – Заведующий кафедрой Энергоустановок морских судов и сооружений Севастопольского национального технического университета, доктор техн. наук, профессор.

**Шпилевой Л.В.** – Соискатель кафедры «Обогащения полезных ископаемых» Донецкого национального технического университета.

**Эльперин И.В.** – Проректор по научно-педагогической и воспитательной работе Национального университета пищевых технологий.

**Яковенко А.Е.** – Старший преподаватель Одесского национального политехнического университета, директор Херсонского политехнического колледжа Одесского национального политехнического университета.



## **Дорогие коллеги!**

От имени членов Союза Специалистов по Технологии и Науке Торонто (ATSS) (Канада), редакционной коллегии журнала 'Noosphere' и лично от себя, рад приветствовать вас, дорогие члены редколлегии журнала ААЭКС и всех ученых, инженеров, специалистов, экспертов и бизнесменов!

Мы желаем, чтобы Вы продолжили начатые традиции и расширили новые отношения и контакты!

Мы - относительно новая организация, которая была основана в 2002 г., но уже имеет коллектив профессионалов. Мы будем рады скоординировать ваши действия. Мы создали научно-практический профессиональный журнал "Noosphere", основанный ATSS в 2003 г., который был зарегистрирован как официальный канадский журнал в 2004 г.. В настоящее время мы организуем, в дополнение к основным выпускам журнала, электронные версии с отдельными статьями и информацией о журнале.

Для представления ваших научных работ мы предлагаем Вам высылать нам лучшие научные материалы для их публикации в электронной версии (E-mail: [atss\\_v\\_arkadyev@yahoo.com](mailto:atss_v_arkadyev@yahoo.com) <[mailto:atss\\_v\\_arkadyev@yahoo.com](mailto:atss_v_arkadyev@yahoo.com)>). Для рассмотрения Ваших материалов мы привлекли лучших профессоров университета и ученых в Торонто (Канада). Кроме того, мы предлагаем вам расширить круг ваших деловых интересов на канадском рынке, а также предлагаем хорошие возможности дать объявление не только академического, но также и предпринимательского характера.

Мы желаем всем членам редколлегии и всем ученым, инженерам, специалистам и бизнесменам новых научных достижений, оптимизма и единства!

***С наилучшими пожеланиями, В.Ю. Аркадьев***

Профессор, доктор технических наук, Член Союза Специалистов по Технологии и Науке Торонто (Канада), Заместитель Главного редактора журнала 'Noosphere' (Канада), член ОАСЕТТ (Канада), Член редакционной коллегии журнала "Автоматика. Автоматизация. Электротехнические Комплексы и Системы" (Украина), Член программного комитета Международной Конференции по Автоматическому Управлению "Автоматика – 2001" (Украина)

E-mail: [atss\\_v\\_arkadyev@yahoo.com](mailto:atss_v_arkadyev@yahoo.com) <[mailto:atss\\_v\\_arkadyev@yahoo.com](mailto:atss_v_arkadyev@yahoo.com)>

Вебсайты: <<http://www.noosphera.com>> и <<http://www.atss.org>>

**Уважаемые авторы журнала  
«Автоматика. Автоматизация.  
Электротехнические комплексы и системы»!**

Редакция убедительно просит Вас оформлять материалы в соответствии с предъявляемыми требованиями. Соблюдение этих требований ускоряет процесс обработки статьи, а также гарантирует ее публикацию в оригинальном виде.

Статьи, оформленные с грубыми нарушениями, редакцией к публикации приниматься не будут.

К оформлению материалов есть следующие пожелания:

- Соблюдайте **размер** шрифта, абзацы и поля.
- Используйте **указанное** программное обеспечение для создания рисунков, таблиц и формул.
- Рисунки желательно размещать с атрибутом «В тексте», при невозможности – обязательно **группируйте**.
- Надписи на рисунках должны быть **читаемы**.
- Не следует делать надписи в рисунках табуляцией, пробелами и абзацами, т.е. обычным текстом, используйте для этого инструмент «Надпись»
- Если рисунок цветной, при выборе палитры и стиля линий необходимо учитывать, что при печати в оттенках серого они должны быть различимы.
- Обязательно подписывайте рисунки и обозначайте **оси** на графиках.
- В редакторе формул используйте **указанные** размеры, а также стиль символов, как и у переменных, набранных обычным текстом.
- Не злоупотребляйте разрывами разделов.

Подробные требования к оформлению приведены на следующей странице. Шаблон Word для оформления материалов можно скачать по адресу: [www.aaecs.narod.ru](http://www.aaecs.narod.ru)

Также редакция напоминает авторам, что материалы должны содержать:

- Текст статьи.
- Электронный вариант статьи.
- Экспертное заключение о возможности опубликования в средствах массовой информации.
- **Аннотации** на русском, английском и украинском языках.
- **Сведения об авторах** с точным указанием должностей, места работы, адресов, электронной почты, контактных телефонов.

***Редакция ААЭКС***

# ВНИМАНИЮ АВТОРОВ ЖУРНАЛА!

## ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ СТАТЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА «АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ»:

1. Тексты статей (до 10 стр.) представляются в электронном и печатном виде. Аннотации - на украинском, русском и английском языках, экспертное заключение о возможности опубликования, рецензия. Сведения об авторах должны включать: Ф.И.О., адрес, телефон (домашний и служебный), место работы, научные степень и звание, должность.

2. Статьи должны отражать (Постановление ВАК Украины № 7-06/1 от 15 января 2003г.): постановку проблемы в общем виде и ее связь с важными научными практическими заданиями; анализ последних исследований и публикаций; выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья; формулировку целей статьи; изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов; выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

3. Материалы, полученные некомплектно, оформленные небрежно и не в соответствии с настоящими правилами, редколлегией не рассматриваются.

4. Авторы представляют в редакцию текст статьи и аннотации в виде файла формата Microsoft Word на дискете 3,5 дюйма.

### ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТОВОМУ ФАЙЛУ.

Страницы: размер бумаги - 210 x 297 мм (A4), без нумерации, переносы не допускаются.

Поля: верхнее – 2 см, нижнее – 2 см, правое – 2 см, левое – 2,5 см.

Шрифт – Times New Roman. Интервал – одинарный.

Материалы представляются в следующем порядке:

- **УДК.** Шрифт – 12 пт., прописные. Абзац – без отступов, выравнивание по левому краю, интервал после – 12 пт.
- **Название статьи.** Шрифт – 14 пт., прописные. Абзац – без отступов, выравнивание по центру.
- **Фамилии и инициалы авторов.** Шрифт – 12 пт. Абзац – без отступов, выравнивание по центру, интервал до и после – 12 пт.
- **Текст статьи.** Шрифт – 12 пт. Абзац – 1,25 см, выравнивание по ширине.
- **Литература.** Слово «ЛИТЕРАТУРА»: шрифт – 12 пт, прописные; абзац – без отступов, выравнивание по центру, интервал до -12 пт., после – 6 пт. Список источников: нумерованный список, шрифт – 12 пт.; абзац – 1,25 см, выравнивание по ширине. Список источников оформляется в соответствии с требованиями ВАК Украины.
- **Рисунки.** Формат – Рисунок Microsoft Word, объект Corel Draw (версия не старше 10, текст должен быть преобразован в кривые) или точечный рисунок. Положение рисунка – в тексте. Под рисунком располагается надпись вида: «Рис. 1 Название рисунка». Абзац – без отступов, выравнивание по центру, интервал до и после – 6 пт.
- **Формулы.** Набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. параметры настройки редактора: обычный – 12 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 18 пт., мелкий символ – 12 пт. Абзац – без отступов, выравнивание по центру. Справа от формулы в скобках указывается её порядковый номер.
- **Таблицы.** Формат – Microsoft Word или Excel. Над таблицей справа указывается номер таблицы вида: «Таблица 1». Ниже, по центру, размещается её название. Интервал до и после – 6 пт.
- **Аннотации.** Абзац – 1,25 см, выравнивание по ширине, интервал до и после – 6 пт. Аннотации представляются на украинском, русском и английском языках. Шаблон документа для оформления материалов можно взять в редакции.

Научно-технический журнал для публикации принимает работы по следующим научным направлениям:

- моделирование объектов и систем управления
- информационно-измерительные системы
- информационно-управляющие комплексы и системы
- оптимальное управление объектами и системами
- методы построения адаптивных систем управления
- цифровые и дискретные системы управления
- современные технические средства, комплексы и системы
- энергетический менеджмент
- экономика научно-технического прогресса

*Научно-технический журнал "Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы" приглашает к сотрудничеству организации на взаимовыгодных условиях. Журнал имеет общегосударственную сферу распространения.*

*Обращаться по адресу:*

73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24  
ХНТУ, Редакция журнала ААЭКС  
Бражнику Александру Михайловичу  
т.: (0552) 552968, 326937  
E-mail: [aaecs@yandex.ru](mailto:aaecs@yandex.ru), [app@kstu.edu.ua](mailto:app@kstu.edu.ua)

---

Рефераты научно-технического журнала аннотируются по сети INTERNET

---

Работы следует направлять в редакцию журнала по адресу:

73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24, ХНТУ, Редакция журнала ААЭКС  
E-mail: [aaecs@yandex.ru](mailto:aaecs@yandex.ru), [app@kstu.edu.ua](mailto:app@kstu.edu.ua)  
Справки по телефонам: (0552) 552968, 326937